

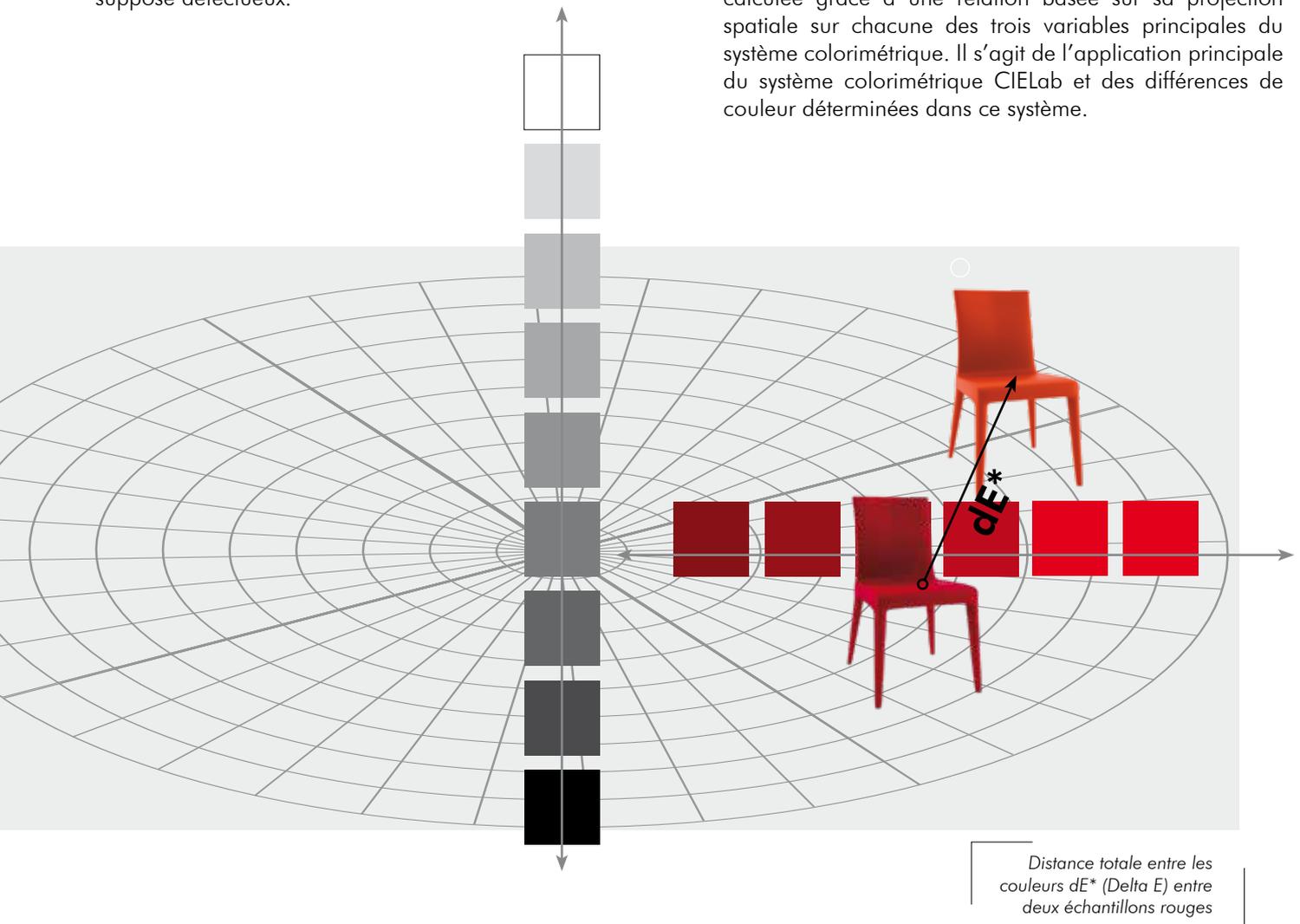
Distances colorimétriques,
métamérisme et équations
pratiques de la couleur

Distances entre les couleurs et acceptabilité des couleurs

Introduction

La plupart des industries exigent que leurs produits présentent une couleur uniforme d'un lot à l'autre. Par exemple, si vous peignez une pièce et que vous vous retrouvez à court de peinture, vous vous attendez à ce qu'il n'y ait aucune différence visible entre les deux lots de peinture utilisés. Il existe également des produits pour lesquels il est essentiel de parvenir à une uniformité des couleurs dans une variété de matériaux. Votre voiture contient des pièces qui sont de la même teinte, telles que des accoudoirs en plastique, des tapis, des intérieurs en tissu, etc., fabriqués à partir de matériaux et procédés différents. Ces composants présentent généralement de légères différences de couleur si vous les placez côte à côte, mais si les différences sont minimes, vous les jugerez visuellement acceptables. Dans les deux cas, si les couleurs ne correspondent pas du tout, vous refuserez le produit supposé défectueux.

Dans la pratique, il est généralement impossible de reproduire la couleur d'un produit avec un taux d'exactitude de 100 %. Comme le montre l'exemple ci-dessous, le t-shirt peut présenter des différences de couleur minimales à différents endroits, même si nous ne percevons aucune différence visuelle. La colorimétrie permet de mesurer et d'enregistrer ces différences de couleur. La mesure colorimétrique ainsi que l'évaluation des différences de couleur aident énormément le fabricant à respecter les spécifications établies entre le client et le fournisseur. Pour déterminer la différence entre les couleurs de deux échantillons, les coordonnées de couleur de l'échantillon étalon et celles de l'échantillon reproduit sont saisies dans un espace colorimétrique ; la distance entre ces deux points de couleur montre la différence de couleur entre les échantillons. La distance entre deux points est calculée grâce à une relation basée sur sa projection spatiale sur chacune des trois variables principales du système colorimétrique. Il s'agit de l'application principale du système colorimétrique CIE Lab et des différences de couleur déterminées dans ce système.



Différences de couleur dans l'espace colorimétrique CIELab

La distance entre deux couleurs est indiquée par dE (ou Delta E, ΔE). Elle peut être calculée selon une formule mise au point en 1976. L'espace colorimétrique CIELab permet donc de représenter les déviations colorimétriques à l'aide des deux procédures suivantes :

- Dans le cas de coordonnées L^* , a^* et b^* tracées perpendiculairement, on utilisera la formule suivante :

$$dE^* = \sqrt{dL^{*2} + da^{*2} + db^{*2}}$$

où

- L^* représente l'écart par rapport à la clarté sur l'axe L^*
- da^* représente l'écart par rapport au rouge vert sur l'axe a^*
- db^* représente l'écart par rapport au jaune bleu sur l'axe b^*



Étalon (S_0)



Échantillon (E_1)

$L^*_0 = 52.15$	$dL^* = +3.40$	$L^*_1 = 55.55$
$a^*_0 = +51.72$	$da^* = +2.60$	$a^*_1 = +54.32$
$b^*_0 = +19.29$	$db^* = +1.80$	$b^*_1 = +21.09$

$$dE^* = \sqrt{dL^{*2} + da^{*2} + db^{*2}}$$

$$dE^* = \sqrt{3.40^2 + 2.60^2 + 1.80^2} = 4.64$$

par D65/10°

Espace colorimétrique CIELab. Distances entre les couleurs dans $L^* a^* b^*$

- Dans le cas de coordonnées L^* , C^* et h tracées sur le cylindre, on utilisera la formule suivante :

$$dE^* = \sqrt{dL^{*2} + dC^{*2} + dH^{*2}}$$

où

- dL^* représente l'écart par rapport à la clarté sur l'axe L^*
- dC^* représente l'écart par rapport à la coloration ou la saturation sur le rayon C^*
- dH (en degrés) représente l'écart par rapport à l'angle de teinte sur h



Étalon (S_0)



Échantillon (E_1)

$L^*_0 = 52.15$	$dL^* = +3.40$	$L^*_1 = 55.55$
$C^*_0 = 55.20$	$dC^* = +3.06$	$C^*_1 = 58.26$
$h_0 = 20.45^\circ$	$\left. \begin{array}{l} dh = 0.77^\circ \\ dH^* = 0.78 \end{array} \right\}$	$h_1 = 21.22^\circ$

$$dE^* = \sqrt{dL^{*2} + dC^{*2} + dH^{*2}}$$

$$dE^* = \sqrt{3.40^2 + 3.06^2 + 0.78^2} = 4.64$$

par D65/10°

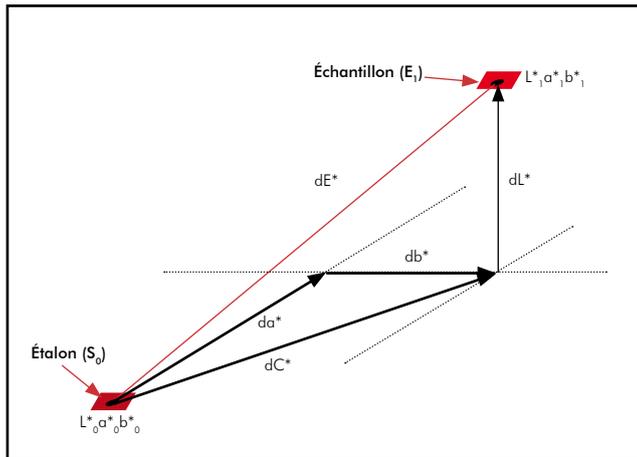
Espace colorimétrique CIELab. Distances entre les couleurs dans $L^* a^* b^*$

Puisque l'équation pour calculer la distance (pour le paramètre dh) ne peut être exprimée qu'en unités de longueur, la distance de l'angle de teinte dh (mesurée en degré) est convertie en unité de longueur. Cette distance de teinte est représentée par dH^* et évolue en fonction du rayon du cercle chromatique C^* , qui désigne la saturation.

Écarts colorimétriques et tolérances colorimétriques dans l'espace couleur CIE Lab $L^* a^* b^*$

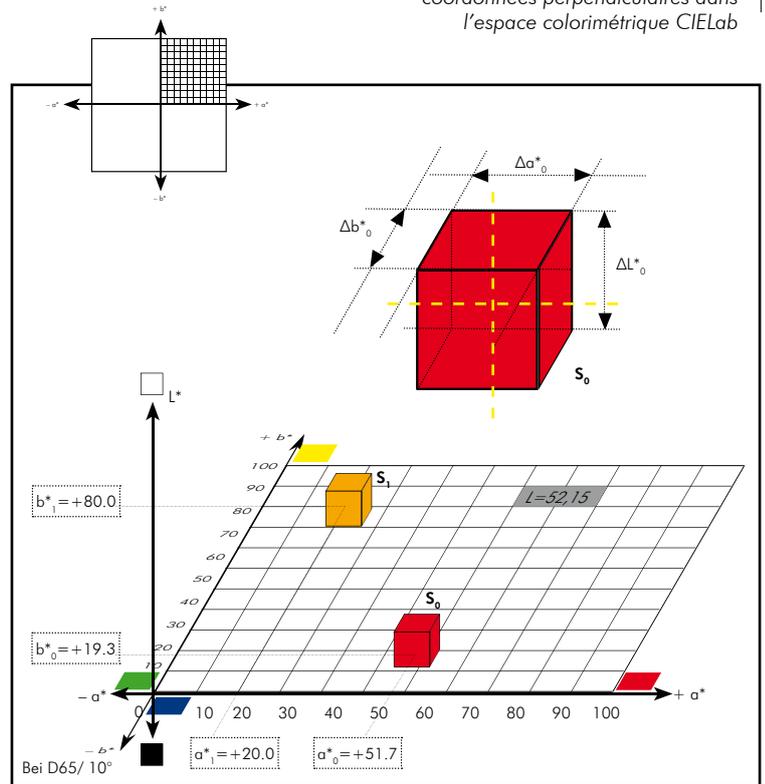
La description d'une déviation colorimétrique par des coordonnées tracées perpendiculairement L^* , a^* et b^* , en termes de perception, suit la théorie des couleurs opposées :

- Écart sur l'axe rouge-vert : projection de la distance sur l'axe a^*
- Écart sur l'axe bleu-jaune : projection de la distance sur l'axe b^*



Déviation colorimétriques dL^* da^* db^* exprimées en coordonnées perpendiculaires

Tolérances dL^* da^* db^* exprimées en coordonnées perpendiculaires dans l'espace colorimétrique CIE Lab



dE^* distance totale entre les couleurs
 dL^* différence de luminosité (⊖ = tons plus foncés; ⊕ = tons plus clairs)
 da^* différence avec le vert ⇔ rouge (⊖ = plus vert; ⊕ = plus rouge)
 db^* différence avec le jaune ⇔ bleu (⊖ = bluer; ⊕ = plus jaune)

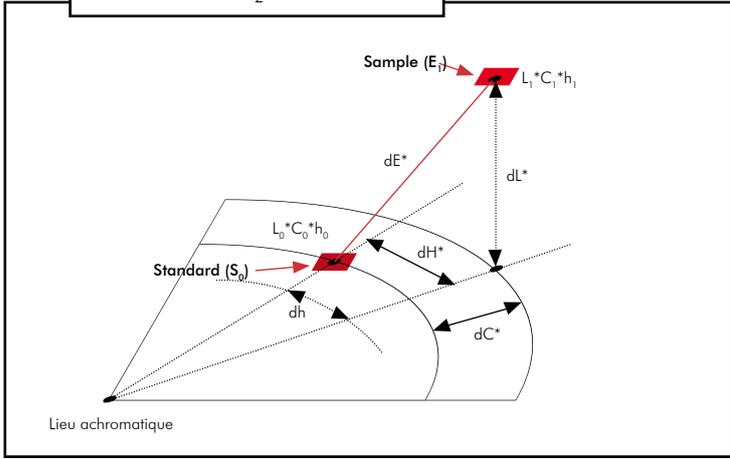
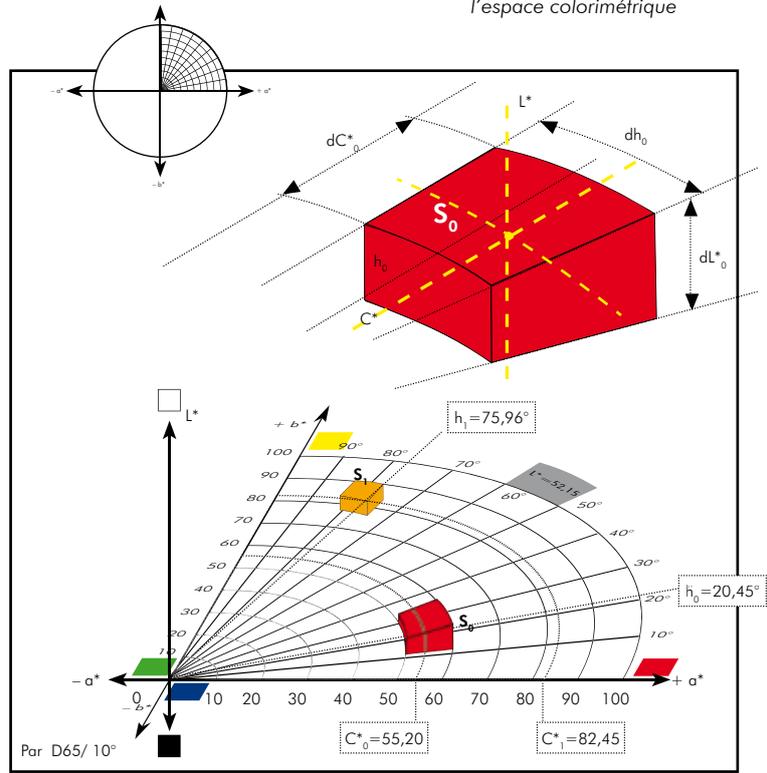
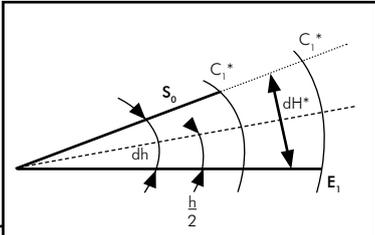
Écarts colorimétriques et tolérances colorimétriques dans l'espace couleur CIE Lab $L^* C^* h^*$

À la différence du système théorique $L^*a^*b^*$, les couleurs dans l'espace de perception réel ne se comportent pas de manière linéaire les unes avec les autres. L'œil humain ne perçoit pas les distances entre les couleurs (vert, rouge, jaune, bleu) de la même façon qu'il distingue les différences de coloration (saturation) et de luminosité. En général, un individu perçoit d'abord les distances dans la nuance de couleur, puis dans la coloration et finalement, dans la luminosité. Par exemple, une distance entre deux couleurs $dE = 1$ constitue une différence de couleur acceptable pour les nuances jaunes ou vertes brillantes ; en revanche, pour les gris achromatiques, $dE = 1$ représente une différence de couleur qui n'est pas acceptable.

La même différence mathématique de 1 ne correspond donc pas à notre perception visuelle. L'espace colorimétrique $L^* C^* h$ CIE Lab propose une alternative dans la zone « achromatique ». La détermination de la déviation colorimétrique par les coordonnées tracées sur le cylindrique L^* , C^* et h dans l'espace colorimétrique CIE Lab permet de décrire la couleur et les distances entre les couleurs telles que nous les voyons. La différence de couleur totale (dE^*) se divise en trois parties : la différence de luminosité (dL^*), la différence de saturation (dC^*) et la différence de teinte (dH^*).

Tolérances dL^* dC^* dh exprimées en coordonnées cylindriques dans l'espace colorimétrique

Déviations de couleur dL^* dC^* dh exprimées en coordonnées cylindriques



$$dE^* = \sqrt{(dL^*)^2 + (dC^*)^2 + (dh^*)^2}$$

L* Axe de luminosité

dL^* = Différence de luminosité : la valeur et l'interprétation sont conformes à la description dans le système $L^*a^*b^*$

C* Saturation (coloration)

dC^* = Différence de coloration : représente la différence dans les distances entre chaque point de couleur et l'axe de luminosité.

$dC^* = C_1^* - C_0^*$
 where C_0^* = saturation de l'étalon et
 and C_1^* = saturation de l'échantillon

- Si dC^* est positif, le niveau de chromaticité de l'échantillon est plus élevé que celui de l'étalon
- Si dC^* est négatif, le niveau de chromaticité de l'échantillon est plus faible que celui de l'étalon

H° nuance de couleur (angle)

dh = différence dans l'angle de teinte : représente la différence d'angle (en degrés) entre les directions des vectoriels associés aux deux couleurs (étalon et échantillon). La différence d'angle dh est convertie en une distance de longueur dh^* en utilisant la transformation suivante :

$$dh^* = 2 \sqrt{C_0^* C_1^*} \cdot \sin\left(\frac{dh}{2}\right)$$

Décomposer la différence de couleur totale dE^* en dL^* , dC^* et dh^* de cette manière permet de la comparer à la description des déviations colorimétriques en utilisant l'évaluation visuelle dans la classification naturelle. Il s'agit d'une méthode couramment appliquée car plus simple et plus pratique.

Les spécialistes de la couleur utilisent très souvent dL^* , da^* et db^* pour exprimer les déviations colorimétriques, à condition que $C^* \leq 5$ et que la distance entre les couleurs soit évaluée selon $L^*C^*H^* > 5$. Si $C^* \leq 5$, les coordonnées $L^*a^*b^*$ doivent alors être utilisées pour l'évaluation. Au contraire, si la valeur $C^* > 5$, ce seront les coordonnées $L^*C^*H^*$ qui devront être employées pour l'évaluation.

Système de conformité CMC (Color measurement committee)

Les formules de calcul des distances entre les couleurs dans les espaces colorimétriques L*a*b* et L*C*h CIElab ont l'avantage d'être relativement simples et pratiques à appliquer.

Le système colorimétrique CIElab présente toutefois l'inconvénient de ne pas être une échelle uniforme au niveau visuel. Les distances entre les couleurs calculées ne correspondent pas aux distances entre les couleurs perçues ou détectées pour toutes les couleurs. Dans la pratique, cela signifie que pour les couleurs achromatiques, l'œil humain peut distinguer les plus infimes différences de nuance dans la couleur. La valeur numérique de dE^*_{ab} la plus basse a dû être définie dans ce cas. Plus les nuances de couleurs évaluées. Plus les nuances de couleurs évaluées sont brillantes, c'est-à-dire, plus les valeurs C sont élevées, plus les couleurs dans le système CIElab sont éloignées et plus la sensibilité avec laquelle l'œil humain réagit aux distances entre les couleurs diminue. Ici, entre autres, une différence dE^*_{ab} numériquement supérieure n'est pas reconnue par l'œil. L'œil évalue nettement mieux les différences de nuance dans la couleur que les différences de luminosité ou de saturation (brillance).

Afin d'éviter d'avoir à déterminer les tolérances colorimétriques par couleur dans le système CIElab, et de le rendre davantage conforme à l'œil humain, la formule de calcul des distances entre les couleurs dE^*_{ab} a été améliorée. Ceci a permis d'établir la formule CMC, par exemple, largement répandue aujourd'hui dans le secteur du textile.

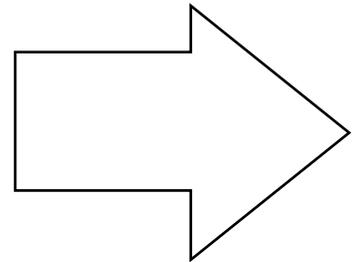
Colourists, Comité de mesure des couleurs de la société des teinturiers et des coloristes). La formule CMC a été publiée en 1984.

Les « composants » de dE , c'est-à-dire dL , dC et dH , sont pondérés avec les facteurs de correction S_L , S_C et S_H , qui dépendent eux-mêmes de la luminosité, de la coloration et de la teinte. S_L , S_C et S_H sont essentiellement des fonctions hyperboliques, servant à augmenter dL et dC à mesure que les couleurs deviennent plus sombres et plus achromatiques (plus grises). dH diminue également à mesure que la saturation augmente. De même, une correction est effectuée en fonction du positionnement du cercle chromatique.

La formule de calcul des distances entre les couleurs CMC est la suivante :

$$dE_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{dL^*}{1 S_L}\right)^2 + \left(\frac{dC^*}{C S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH^*}{S_H}\right)^2}$$

- L** facteur de clarté
- c** facteur de saturation
- S_L** fonction de L
- S_C** fonction de C
- S_H** fonction de H et C



- Valable pour S_L :
Si $L^* < 16$ ρ $S_L = 0.511$

$$\text{Si } L^* \geq 16 \rho \quad S_L = \frac{0.040975L^*}{1 + 0.01765L^*}$$

Cette action permet d'améliorer l'évaluation des valeurs dL de près de 200 % dans le cas de couleurs très sombres !

- Valable pour S_C :
$$S_C = \frac{0.0638C^*}{1 + 0.0131C^*} + 0.638$$

Avec le paramètre S_C , les valeurs dC proches de l'axe achromatique sont pondérées d'environ 60 % de plus. Pour les couleurs brillantes (valeurs de saturation élevées), la formule CMC diminue les valeurs dC existantes.

- Valable pour S_H :
$$\rho S_H = (FT + 1 - F) S_C$$

où
$$F = \sqrt{\frac{C^{*4}}{C^{*4} + 1900}}$$

$$\text{et } T = 0.36 + |0.4 \cos(35 + h)|$$

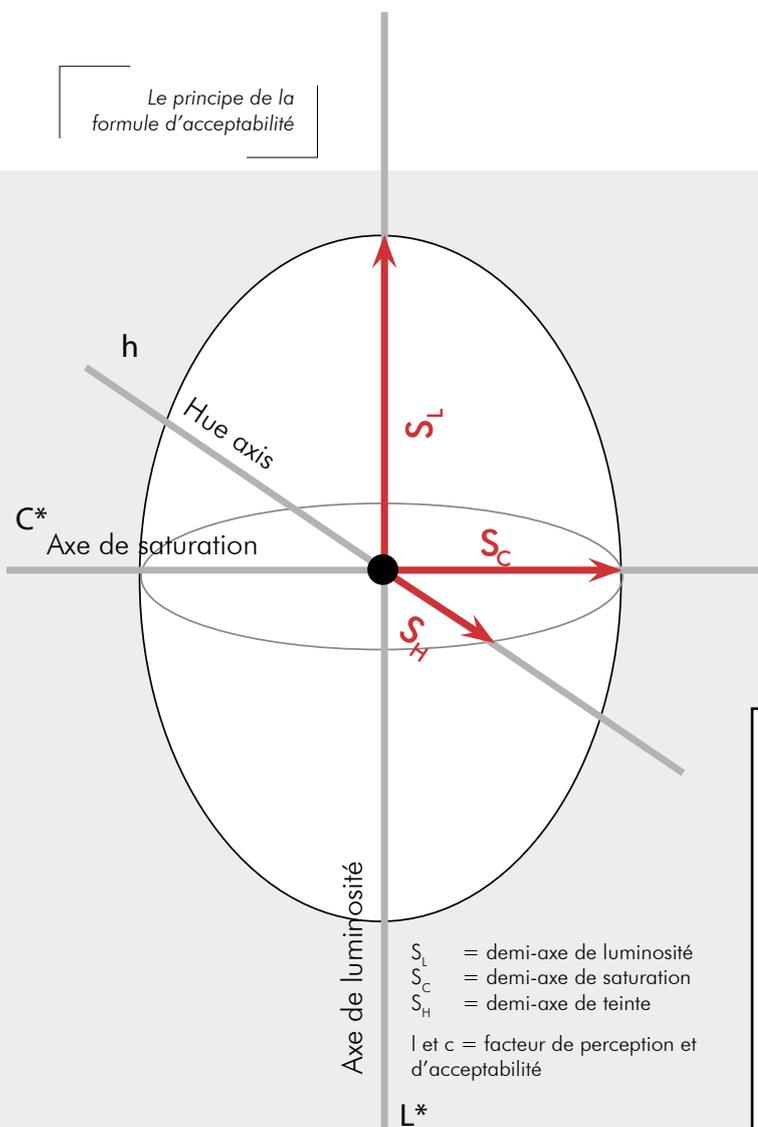
à moins que $164^\circ < h < 345^\circ$

$$\text{Ou } T = 0.56 + |0.2 \cos(168 + h)|$$

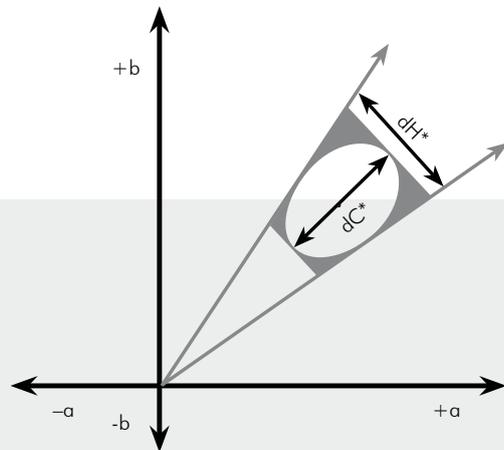
Remarque : | représente une valeur absolue

Sous l'effet de S_C , les valeurs dH données proches de l'axe achromatique sont plus fortement pondérées, mais pas aussi nettement qu'avec S_C seul, en raison du rôle du facteur f . Selon la formule CMC, dH augmente dans les zones orange et violette, et diminue dans les zones verte à bleue et violette à rouge.

Le principe de la formule d'acceptabilité

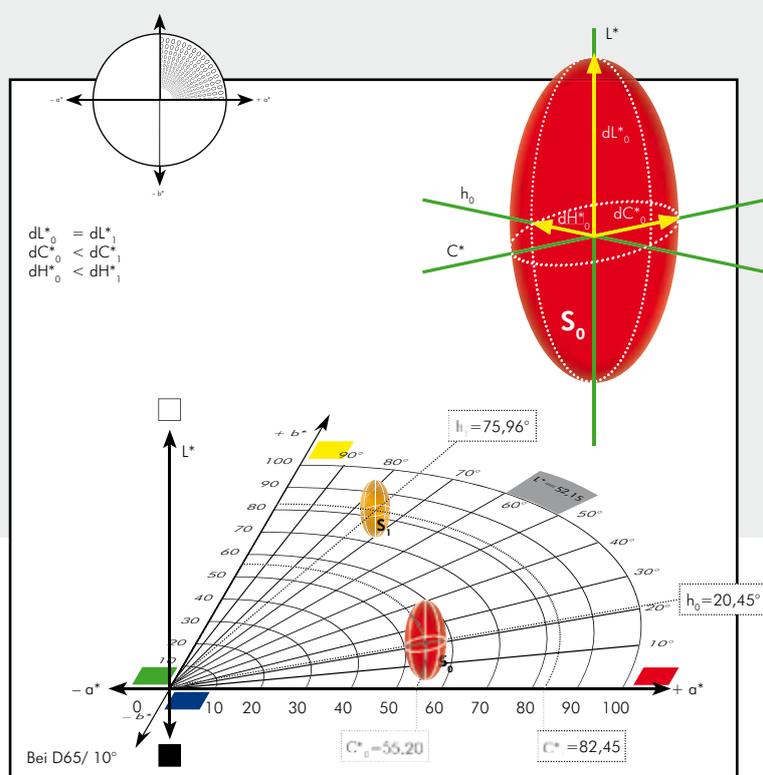


S_L = demi-axe de luminosité
 S_C = demi-axe de saturation
 S_H = demi-axe de teinte
 l et c = facteur de perception et d'acceptabilité



$$dE_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{dL^*}{l S_L}\right)^2 + \left(\frac{dC^*}{c S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH^*}{S_H}\right)^2}$$

CMC – tolérance = ellipsoïde



$$\begin{aligned} dL^*_0 &= dL^*_1 \\ dC^*_0 &< dC^*_1 \\ dH^*_0 &> dH^*_1 \end{aligned}$$

Tolérances colorimétriques d'acceptabilité CMC dans l'espace colorimétrique CIELab

La formule de calcul des distances entre les couleurs CMC est basée sur environ 2 000 échantillons textiles assortis sous un illuminant D65 et mesurés à l'aide de la fonction de l'observateur de référence CIE64 10°.

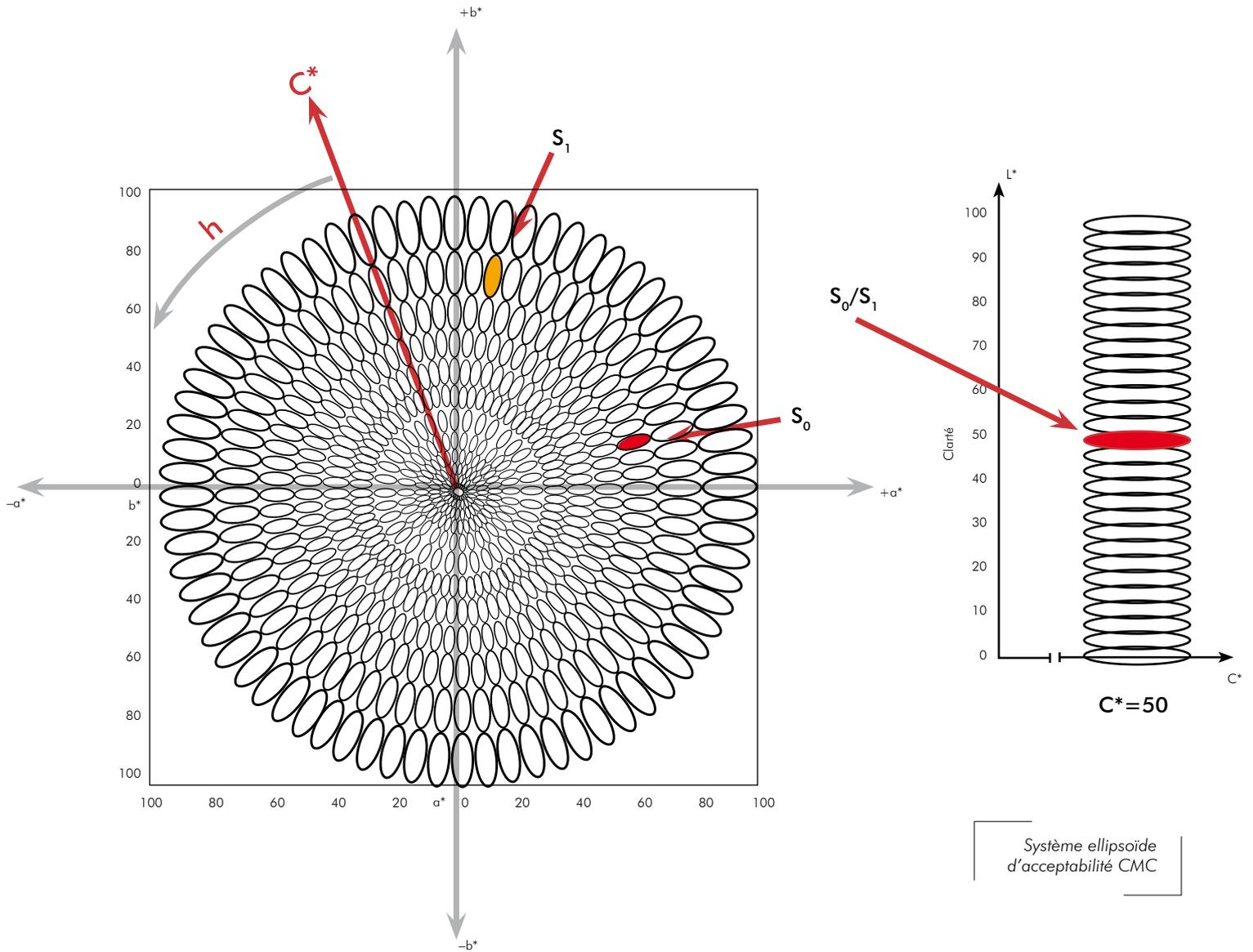
Les paramètres de correction ($SL - SC - SH$) ont donc été évalués de manière empirique et intégrés dans des formules permettant un calcul préalable. De plus, les deux facteurs supplémentaires l (« luminosité ») et c (« saturation ») peuvent influencer les résultats en fonction de la façon dont un problème – surtout en ce qui concerne l'acceptabilité d'un écart – est positionné.

L'utilisateur peut modifier les paramètres de correction l et c . Ils sont tous deux égaux à 1. Il s'agit là d'un des cas les plus courants lors de l'évaluation de la perceptibilité des déviations de couleur. On augmente ou on diminue les valeurs l et c pour évaluer l'acceptabilité. Par exemple, la combinaison CMC (2,1) est utilisée dans le secteur textile, où $l = 2$ et $c = 1$. Ici, $l = 2$ signifie que l'on tient compte uniquement de la moitié de la distance de luminosité pour calculer la distance entre les couleurs totale.

La différence de luminosité (dL^*) évolue en fonction de la luminosité. Elle augmente lorsque les valeurs de luminosité sont faibles et diminue lorsque les valeurs de luminosité sont élevées.

Les différences de coloration (dC^*) évoluent en fonction de la coloration. Elles sont généralement moins importantes par rapport au système CIELab, à l'exception des valeurs basses de coloration, inférieures à 6.

Les déviations de teinte (dH^*) évoluent en fonction de l'angle de teinte et de la coloration. On peut constater, notamment pour les nuances orange, que les déviations colorimétriques deviennent plus importantes par rapport aux nuances vertes et que l'effet des déviations colorimétriques par rapport au système CIELab diminue nettement si les couleurs sont relativement saturées.



Le graphique ci-dessus illustre les incidences de ces paramètres de correction. Les différences constatées visuellement de même ampleur sont représentées sous forme d'ellipses pour la zone a^*/b^* pour une luminosité constante. Les différences à l'intérieur d'une ellipse sont perçues comme équivalentes par l'œil humain. Le côté droit du graphique montre les ellipses d'acceptabilité sur l'axe L^* (avec une coloration constante $C^* = 50$, mais une luminosité variable L^* de 0 à 100).

Le graphique illustre parfaitement le point suivant : La formule CMC n'offre pas un système de représentation uniforme et ne crée pas d'espace colorimétrique, mais permet de calculer les déviations colorimétriques ainsi que l'acceptabilité en se basant sur une évaluation empirique de n'importe quel point de couleur dans l'espace colorimétrique CIElab.

Afin d'améliorer les formules d'acceptabilité et le calcul des distances entre les couleurs, la CIE a développé les formules CIE94 et CIE2000.

Formule de calcul des distances entre les couleurs CIE94

En 1994, la CIE a publié la formule de calcul des distances entre les couleurs CIE94. Elle s'inscrit dans la même logique que la formule CMC, mais fournit trois paramètres de correction (k_L , k_C et k_H) qui peuvent être optimisés en fonction de la zone d'application. On a également ajouté à la formule des conditions d'observation, qui servent de base à la présentation et l'observation des échantillons.

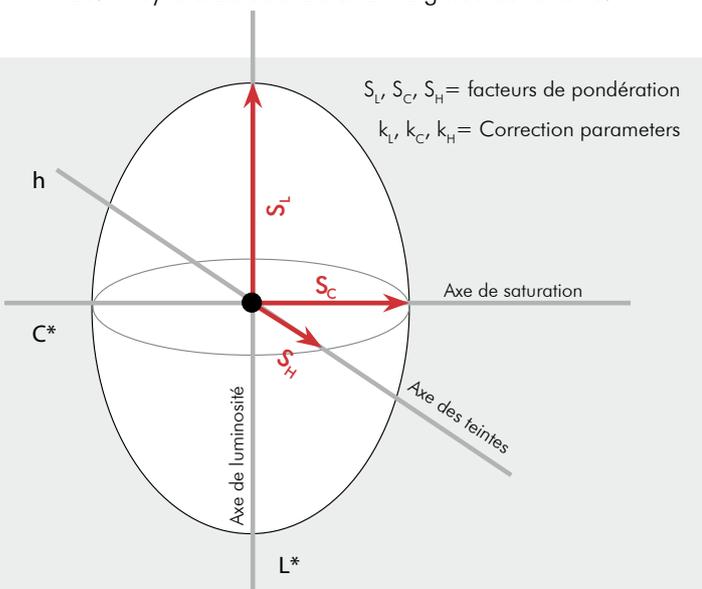
La formule de calcul des distances entre les couleurs CIE94 s'écrit comme suit :

$$dE_{94} = \sqrt{\left(\frac{L_2^* - L_1^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{C_2^* - C_1^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2}$$

$$L_2^* - L_1^* = dL^*$$

The total color distance dE_{94}^* between 2 color samples represents the distance in the CIE76 color space (CIELab) that has been weighted and adjusted by the user. Under specified reference conditions, the formula takes into account the components of these color distances, such as the differences in lightness (dL^*), the difference in colorfulness (dC^*), and the hue difference (dH^*).

The factors S_L , S_C and S_H represent the respective weighting factors for the differences in lightness, colorfulness and hue. They are calculated and weighted as follows:



$$dE_{94} = \sqrt{\left(\frac{L_2^* - L_1^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{C_2^* - C_1^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2}$$

Formule de calcul

Les facteurs k_L , k_C et k_H représentent des paramètres de correction qui sont liés aux conditions d'observation des échantillons. Les conditions de référence sont définies de façon expérimentale comme des conditions types pour l'observation des couleurs de contrôle.

$$\begin{aligned} S_L &= 1 \\ S_C &= 1 + 0.045 C^* \\ S_H &= 1 + 0.0015 C^* \end{aligned}$$

Les conditions de référence:

- Éclairage – source lumineuse : la source lumineuse simule le type d'illuminant normalisé D65, qui correspond à la lumière du jour
- Éclairage de l'échantillon avec une intensité lumineuse d'environ 1 000 lux
- Environnement : fond d'observation uniforme, de couleur gris neutre et luminosité $L^* = 50$
- Les surfaces à observer (échantillons) doivent remplir les conditions suivantes, dans la mesure du possible.
 - Le champ d'observation et la distance doivent être éclairés de telle sorte que le champ de vision soit supérieur au champ de vision fixé au centre de 4°
 - Les échantillons doivent être placés côte à côte en se touchant ; la ligne de séparation ne doit pas être apparente, dans la mesure du possible.
 - La structure, la texture et la couleur doivent être aussi uniformes que possible.

Remarque:

Les facteurs de correction k_L , k_C et k_H représentent encore des outils précieux pour certaines conditions préalables spécifiques. Les facteurs de correction k , k_L et k_H sont égaux à 1 pour les conditions de référence. Les facteurs suivants sont généralement utilisés dans le secteur textile : $k_L = 2$ et $k_C = k_H = 1$.

La formule de calcul des distances entre les couleurs CIE94 doit être exprimée par dE_{94}^* et écrite à l'aide de l'abréviation CIE₉₄. Il n'est pas nécessaire que les paramètres de correction k_L , k_C et k_H soient égaux à 1. Dans ce cas, ils doivent être placés après l'abréviation dE_{94}^* . Voici un exemple tiré du secteur textile : pour les facteurs $k_L = 2$ et $k_C = k_H = 1$, on écrira CIE₉₄ (2:1:1) avec le symbole dE_{94}^* (2:1:1).

Diagramme des tolérances CIE94

CIE2000 – la formule de calcul CIE actuelle des distances entre les couleurs

Bien que la CIE94 représente une amélioration par rapport à la formule CMC, elle a été très peu, voire pas du tout adoptée dans le secteur. Elle a donc été perfectionnée à l'aide de nouveaux ensembles de

données et remplacée par la nouvelle formule CIE2000. La formule de calcul des distances entre les couleurs CIE2000 est celle qui correspond le mieux à la perception visuelle. Elle inclut non seulement des fonctions de pondération pour la luminosité, la coloration et la teinte, mais également les conditions de mélange. Ces dernières tiennent compte du fait que la coloration est tributaire de la teinte.

La formule de calcul des distances entre les couleurs CIE2000 s'écrit comme suit:

$$dE_{00} = \sqrt{\left(\frac{dL^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{dC^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH^*}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{dC^*}{k_C S_C}\right) \left(\frac{dH^*}{k_H S_H}\right)}$$

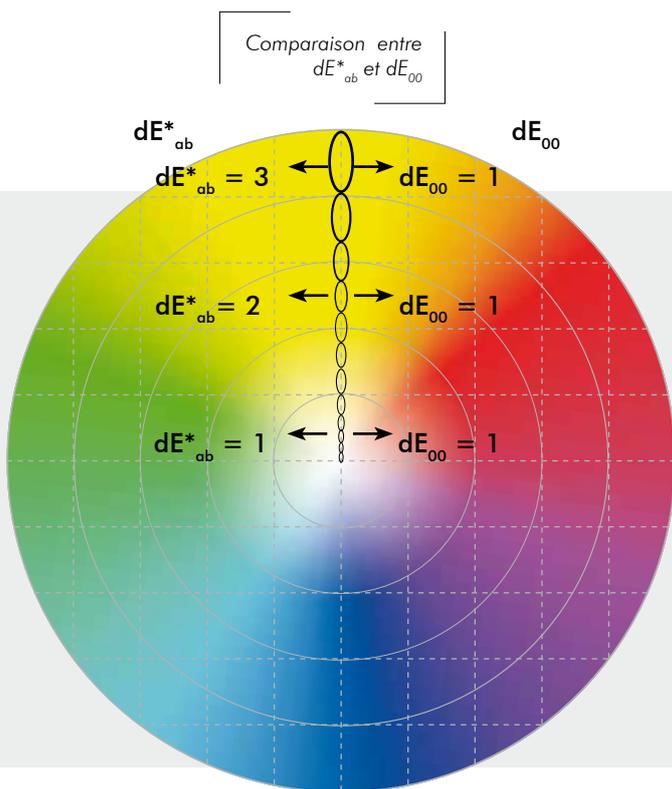
Le dernier terme de l'équation est également connu sous le nom de terme de rotation. Il inclut une pondération supplémentaire dépendante de la teinte « rotative » et vise à corriger des cas particulièrement complexes de non-correspondance entre les distances de couleur calculées et visuellement perçues dans la gamme des bleus.

Toutes les formules de calcul des distances entre les couleurs décrites jusqu'ici peuvent être représentées à l'aide de l'équation ci-dessus. Ainsi, pour CIE94 et CMC, $S_L = 1$. Le terme de rotation n'existe pas pour les formules de calcul des distances entre les couleurs CMC et CIE94, il est donc nul ($R_T=0$).

La formule CIE2000 est celle qui permet de déterminer au mieux une distance entre les couleurs équivalente pour toutes les nuances de couleur.

Évaluation sommaire des formules CMC, CIE94 et CIE2000

Toutes les corrections apportées à la formule originale CIElab dE constituent une amélioration importante dans l'évaluation des différences de couleurs. Cependant, tant qu'il n'existe pas de normes DIN ou ISO, aucune formule dE améliorée ne sera adoptée dans la pratique. Le Comité des normes techniques pour la couleur du DIN (en particulier la commission de travail 4), en parallèle au développement de la CIE (CIE2000), a ainsi décidé de transformer l'ensemble de l'espace colorimétrique afin d'uniformiser l'échelle au lieu de modifier les formules de calcul des distances entre les couleurs elles-mêmes. Il en a résulté un nouveau système de coordonnées de couleurs, qui a ensuite permis de définir un espace colorimétrique incluant une échelle de chromaticité uniforme pour de petites distances entre les couleurs. Les distances entre les couleurs peuvent désormais être calculées en tant que longueur de vecteur à partir des différences de coordonnées de couleur (ici L_{99} , a_{99} et b_{99}) ; c'est ce qu'on appelle un « espace colorimétrique euclidien ». La formule appropriée a été présentée en 1999 sous le nom de formule DIN 99.



Différences relatives de couleur – comparaison des

		L*	a*	b*	C* _{ab}	dE* _{ab}	dE ₉₄	dE ₀₀	dE ₉₉
Cyan (C)	1	54	-37	-50	62.2	6.00	3.54	2.29	2.16
	2	52	-41	-46	61.6				
Magenta (M)	1	47	75	-6	75.2	6.00	2.94	2.66	2.54
	2	45	79	-2	79.0				
Jaune (Y)	1	88	-6	95	95.2	6.00	2.77	2.69	2.54
	2	86	-10	91	91.5				
Noir	1	18	0	-1	1.0	6.00	5.78	6.28	4.76
	2	16	4	-5	6.4				
C+M	1	26	22	-45	50.1	6.00	3.73	4.56	3.97
	2	24	26	-41	48.5				
C+Y	1	49	-65	30	71.6	6.00	3.26	2.97	2.83
	2	47	-69	26	73.7				
M+Y	1	48	65	45	79.1	6.00	3.23	3.48	2.59
	2	46	69	41	80.3				
Papier	1	93	0	-3	3.0	6.00	5.45	6.13	4.09
	2	91	4	-7	8.1				

L'espace colorimétrique DIN 99

L'espace colorimétrique DIN 99 est dérivé de l'espace colorimétrique CIELab avec ses coordonnées L^* , a^* , b^* .

La transformation de CIELab en DIN 99 s'est déroulée en deux parties : la luminosité est devenue une nouvelle luminosité DIN 99 L_{99} . Les coordonnées de coloration ou de saturation ont également été modifiées.

Suite à ces transformations, il a été possible de calculer des valeurs telles que les valeurs de saturation (C99), d'angle de teinte (h99) et de distance entre les couleurs (dE99).

La formule DIN 99 est conçue pour des distances entre les couleurs petites à moyennes. Son application est recommandée pour de petites distances entre les couleurs jusqu'à 5 dE CIELab telles que celles traitées dans les procédures d'assurance de la qualité et le calcul de la recette.

Calcul

Transformation de la luminosité

La luminosité L^* est transformée en luminosité DIN 99 L_{99} :

$$L_{99} = \left(\frac{1}{k_E} \right) \cdot (105.51 \cdot \ln(1 + 0.0158 \cdot L^*))$$

Cette transformation vise à mieux reproduire la distinction des nuances de couleurs plus sombres. La transformation ressemble à une fonction puissance avec un exposant de 0,75. La zone des nuances sombres de la couleur est agrandie et la zone des nuances claires est comprimée. Les valeurs de luminosité moyenne sont décalées vers le haut de l'axe de luminosité.

La variable k_E décrit l'influence des conditions d'observation modifiées.

Dans les conditions de référence, $k_E = 1$.

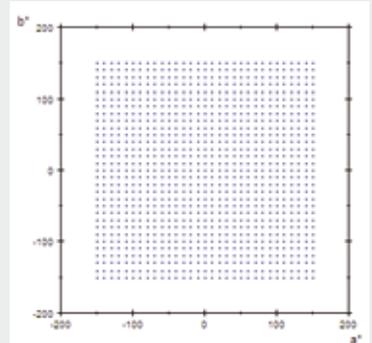
Transformation de la coloration

La transformation des coordonnées de coloration se déroule en trois étapes :

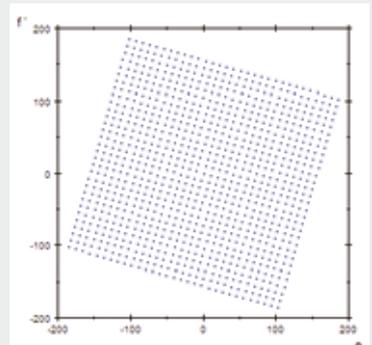
- On fait pivoter l'axe de coloration de 16°
- L'axe jaune/bleu est multiplié par le facteur 0,7 et est donc comprimé
- Les valeurs de coloration (saturation) sont comprimées de manière logarithmique dans le sens radial autour de l'axe L_{99}

Contrairement aux formules CIE94 et CIE2000, il n'est pas nécessaire de déterminer l'angle de teinte afin de calculer la distance entre les couleurs.

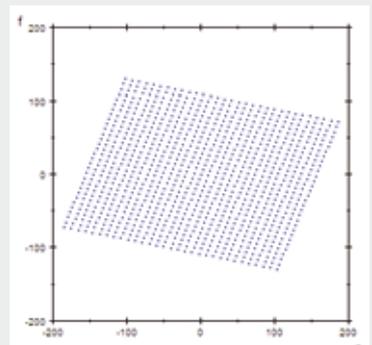
Situation de départ : plan a^*/b^* . Les points figurant dans ces illustrations et les illustrations suivantes représentent chaque ensemble de coordonnées a^*/b^* allant de -150 à 150 par incrément de dix



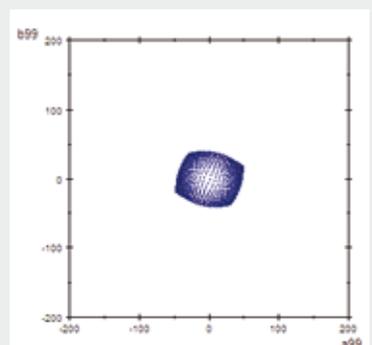
Étape 1 : rotation du plan a^*/b^* de 16°



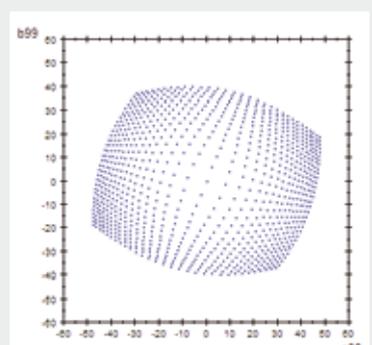
Étape 2 : compression de l'axe f



Étape 3 : compression radiale du plan e/f



Vue agrandie du plan a_{99}/b_{99}



Les calculs individuels se font de la façon suivante :

a^* et b^* sont transformés en :
valeurs

$$e = (a^* \cdot \cos(16^\circ) + b^* \cdot \sin(16^\circ))$$

Valeur jaune f (axe jaune/bleu)

$$f = 0,7 \cdot (-a^* \cdot \sin(16^\circ) + b^* \cdot \cos(16^\circ))$$

Il est alors possible de calculer la valeur de saturation G (coloration) :

$$G = \sqrt{e^2 + f^2}$$

Avec le facteur de compression

$$k = \frac{\ln(1 + 0.045 \cdot G)}{(k_{CH} \cdot k_E \cdot 0.045)}$$

Cela donne

les valeurs de teinte

$$a_{99} = k \cdot \frac{e}{G}$$

$$b_{99} = k \cdot \frac{f}{G}$$

Dans le cas où $a^* = b^* = 0$, et $e = f = G = 0$, alors $a_{99} = b_{99} = 0$.

Par rapport aux autres méthodes de correction,

l'avantage est qu'avec les valeurs a_{99} et b_{99} transformées, vous pouvez désormais procéder exactement comme vous le faites dans CIE Lab, afin de calculer, par exemple, une valeur C_{99} (coloration/saturation corrigée) ou une valeur H_{99} (teinte corrigée).

La formule s'établit donc comme suit :

$$dH_{99} = \frac{(a_{99B} \cdot b_{99P}) - (a_{99P} \cdot b_{99B})}{\sqrt{0,5 \cdot ((C_{99B} \cdot C_{99P}) + (a_{99B} \cdot a_{99P}) + (b_{99B} \cdot b_{99P}))}}$$

ou

$$dE_{99} = \sqrt{(dL_{99})^2 + (da_{99})^2 + (db_{99})^2}$$

où

$$dE_{99} = \sqrt{(dL_{99})^2 + (dC_{99})^2 + (dH_{99})^2}$$

$$C_{99} = \sqrt{(a_{99})^2 + (b_{99})^2}$$

Dans le système DIN 99, dC et dH sont calculés exactement de la même manière que dans CIE Lab. L'indice B représente l'échantillon de référence ou échantillon témoin, et P désigne l'échantillon.

Qualité et évolution future

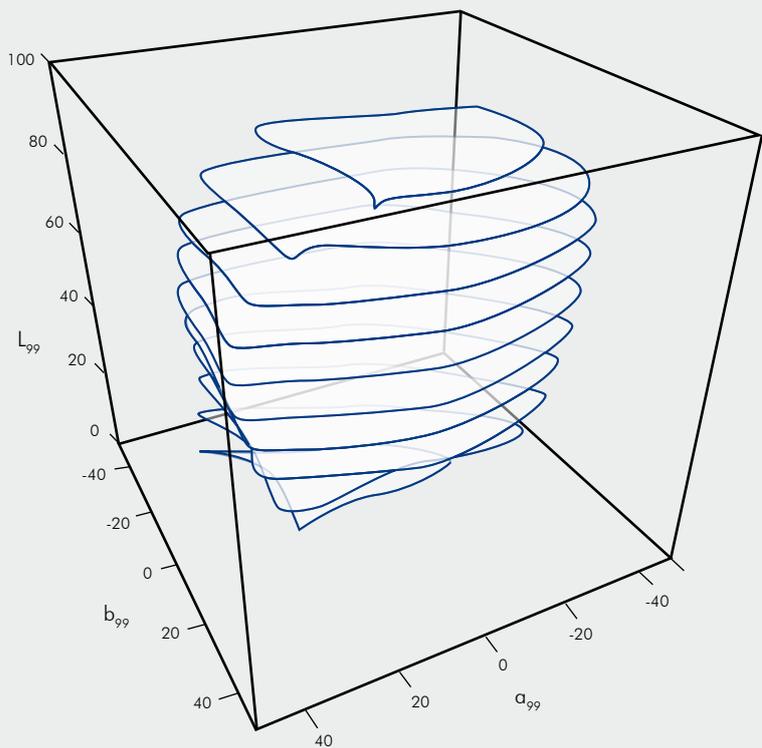
L'espace colorimétrique DIN 99 est très proche de la formule de calcul des distances entre les couleurs CIE94 et possède des caractéristiques qualitatives similaires, également comparables à CMC(l:c). Son avantage par rapport à CIE94 : la permutabilité de l'échantillon et de l'échantillon témoin dans le calcul, rendant ainsi la transformation simple et entièrement réversible.

Il existe toutefois une différence avec CIE Lab en ce qui concerne les calculs : il offre une meilleure correspondance avec les distances entre les couleurs perçues. La formule

DIN 99 est traitée de la même manière que la formule CIE Lab.

L'axe de luminosité a été modifié et la pondération des couleurs proches de l'axe achromatique a été accentuée par la compression des couleurs extrêmement saturées, ce qui a amélioré de façon significative l'uniformité des distances entre les couleurs perçues.

Les catégories d'évaluation des axes de luminosité et de teinte (jaune/bleu et rouge/vert) restent inchangées par rapport à CIE Lab. Le calcul de la distance entre les couleurs comme une simple distance euclidienne constitue un net avantage par rapport à CMC(l:c), CIE94 et CIE2000, pour lesquels le calcul est très complexe.

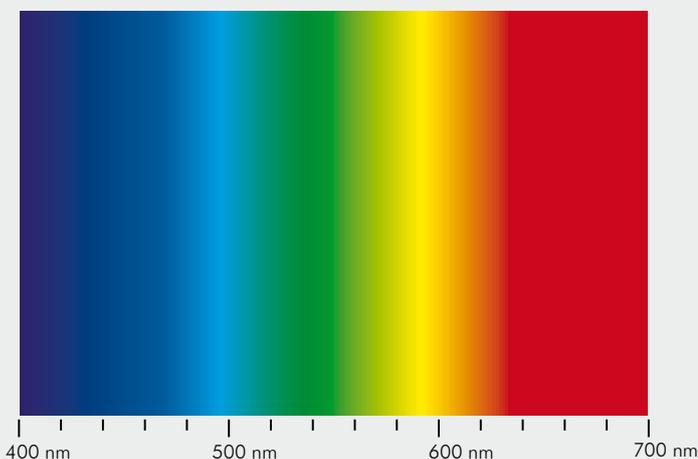


Solide des couleurs optimales DIN 99 – illuminant D65

Exemple d'espace colorimétrique actuel :

Solide des couleurs optimales DIN 99 en coupe transversale. Plans en coupe pour la luminosité $L = 5$ à 95 par incrément de dix. a_{99} représente la direction, 99 jaune/bleu et b_{99} indique la direction. est représentative de la perception visuelle. Récemment, les études effectuées sur la neurophysiologie de la vision et la psychologie de la perception, rouge/vert. Des distorsions se produisent car l'association des couleurs avec la luminosité constitue un facteur à prendre en compte dans les espaces colorimétriques actuels. Ce solide des couleurs a été créé par spectre. La zone représente l'ensemble des couleurs optimales (couleurs avec des niveaux de saturation et de brillance maximum). Le volume du solide des couleurs représente toutes les couleurs possibles du point de vue théorique.

SPECTRE VISIBLE



Conclusion et perspectives d'avenir

La mesure instrumentale de la couleur représente une aide indispensable aux systèmes d'assurance de la qualité dans l'industrie. Elle vient renforcer la correspondance visuelle des couleurs et permet l'intégration de valeurs numériques en tant que tolérances. La collaboration entre les fournisseurs et les clients devient un modèle reproductible, permettant aux deux parties d'utiliser des mesures techniques. Il importe toutefois que les évaluations colorimétriques correspondent autant que possible à l'évaluation visuelle.

Les espaces colorimétriques développés au cours des années sont désormais très proches de la perception de la couleur visuelle. Ils présentent toutefois des défaillances, car la distance entre les couleurs perçue visuellement ne correspond pas, dans de nombreux cas, au paramètre de la distance entre les couleurs mesurées, dE^* .

Des travaux de recherche supplémentaires sont constamment menés afin de développer un espace colorimétrique complètement uniforme ainsi qu'une nouvelle formule de calcul des distances entre les couleurs et une acceptabilité simple qui ainsi que la recherche statistique, ont abouti à une amélioration de l'efficacité des formules d'acceptabilité, rendant leur utilisation automatique toujours plus fiable. Nous pouvons donc affirmer que si les calculs des modèles mathématiques actuels dans le domaine du contrôle automatique objectif des couleurs et des distances entre les couleurs sont parfaitement maîtrisés et exécutés, la mesure des couleurs peut aujourd'hui être appliquée avec précision afin de garantir une qualité élevée des produits colorés.

Metamerism

Le métamérisme est une caractéristique d'une paire d'échantillons. Deux échantillons concordent lorsqu'ils sont visibles par un observateur spécifique sous une lampe spécifique. Toutefois, lorsque la lampe ou l'observateur change, les couleurs ne semblent plus correspondre. Le choix des colorants dans la formulation influe sur le degré de métamérisme entre les échantillons. Les systèmes de correspondance des couleurs informatiques incluent des paramètres pour sélectionner la formule la moins métamérique disponible et obtenir une correspondance de couleur. La formule sélectionnée peut être celle qui convient le mieux à la couleur sous différentes conditions d'observation et d'éclairage, et vous ne serez sans doute pas en mesure de détecter visuellement le métamérisme entre les échantillons lorsque vous modifiez l'une ou l'autre condition.

Lorsque vous utilisez les mêmes ingrédients dans l'échantillon original pour obtenir une correspondance de couleur, vous pouvez associer la courbe spectrale de l'objet, longueur d'onde par longueur d'onde. Cela n'est toutefois pas indispensable pour reproduire une couleur. Dans les applications commerciales, il est courant de faire correspondre la description colorimétrique d'une couleur particulière. Vous pouvez trouver une formule qui correspond aux composantes trichromatiques d'une couleur pour des conditions d'observation et d'éclairage spécifiques. Pour ce faire, vous n'avez pas besoin d'avoir les colorants exacts utilisés pour créer la couleur de référence. Vous pouvez trouver plusieurs recettes différentes permettant d'obtenir une correspondance de couleur. Toutefois, il ne faut pas oublier que modifier les conditions d'observation et d'éclairage change la description colorimétrique de la couleur. Lorsque vous associez les composantes trichromatiques, si vous modifiez l'une des deux conditions, les couleurs peuvent ne plus correspondre.

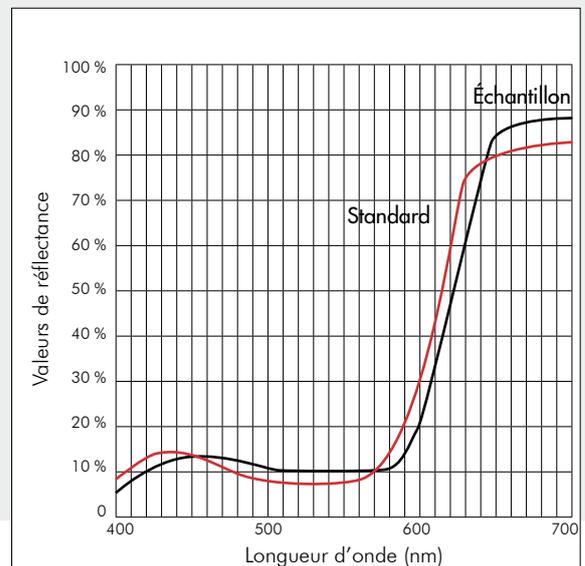


Metamerism

Spécifications standard (X-Y-Z) pour l'observateur normal 10

	Type d'illuminant D65 (lumière du jour)		Type d'illuminant A (lumière artificielle)	
	Standard STD.N	Échantillon n° 2 ECH2.N	Standard STD.N	Échantillon n° 2 ECH2.N
X	X _{0D} = 31.28	X _{2D} = 31.28	X _{0A} = 47.88	X _{2A} = 52.66
Y	Y _{0D} = 20.28	Y _{2D} = 20.28	Y _{0A} = 27.57	Y _{2A} = 31.41

Fonctions de correspondance des couleurs



Liste de références

- Farbe sehen, Corinna Watschke, 01.2009 [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]
- Farbabstandsformeln, 2012, Fogra Forschungsgesellschaft Druck e.V. [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]
- 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 | www.datacolor.com

Texte:

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

www.hiller-direct-marketing.de

Août 2019

© 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