

De la couleur à la colorimétrie

1. La colorimétrie et l'industrie

La colorimétrie est la science qui permet de déterminer les propriétés d'un objet en fonction de sa couleur. Plus particulièrement, c'est la science de la couleur qui permet de quantifier c'est à dire de chiffrer la couleur d'un corps.

L'aspect extérieur d'un produit fini est sans doute son attribut le plus important. C'est sans doute l'aspect qui indique au vendeur si le produit est commercialisable ou non. Toutes les industries sont concernées par l'apparence de leurs produits.

L'apparence englobe les aspects visuels tels que la couleur, le brillant, la forme, la texture, l'opacité ou la transparence qui caractérisent les objets.

Lorsque les consommateurs ont la possibilité de choisir entre plusieurs produits, ils se décident pour ceux qui ont à leurs yeux le meilleur aspect.

L'apparence constitue donc le message primordial du produit.

Les acheteurs s'attendent également à ce que tous les produits d'un même lot aient la même apparence uniforme.

Lorsqu'ils voient une différence entre plusieurs produits d'une même catégorie, cette différence est aussitôt considérée comme un critère de mauvaise qualité.

L'évaluation visuelle de l'aspect d'un ensemble d'objets, dépend de l'observateur (facteurs physiologiques) qui analyse les échantillons.

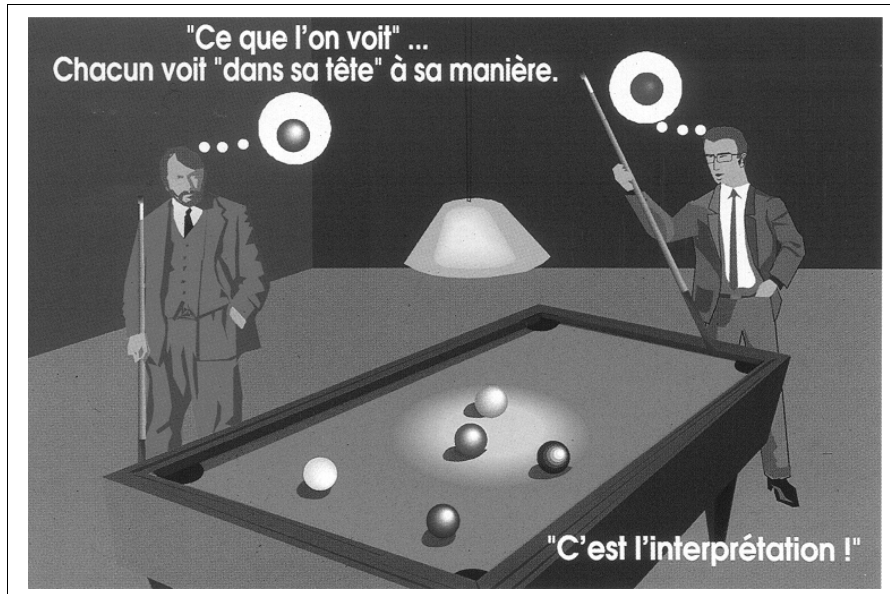
Cette analyse a un caractère subjectif (qui dépend de l'observateur)

L'évaluation de l'aspect d'un objet et en particulier sa couleur doit être objective (indépendante de l'observateur) et donc fondée sur des théories officielles et ou normalisés. C'est tout le but de la colorimétrie.

2. Description de la sensation visuelle de couleur

2.1 LE TRIPLET

Quelle est la couleur exacte d'un objet ?



Il n'y a pas de réponse simple, car la couleur n'est pas une réalité physique.

Elle est dans le cerveau et pas dans la matière.

La couleur est une interprétation par le cortex de perceptions venues de l'œil.

Il est fort possible

qu'elle soit différente d'un individu à l'autre.

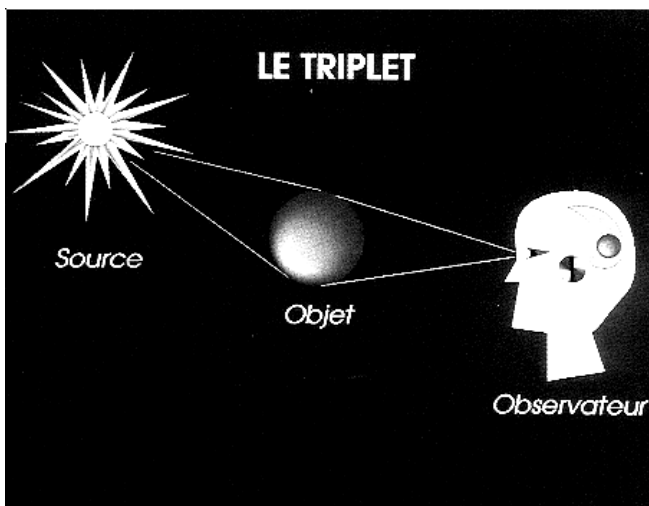
La matière n'a pas de couleur.

Elle ne fait que de réfléchir plus ou moins des rayons auxquels l'œil est sensible.

Le spectre des ondes électromagnétiques est très vaste. Une étroite zone nous est perceptible : c'est la lumière (voir expérience de la dispersion de la lumière par un prisme).

Puisque c'est le flux lumineux (la lumière) qui active l'œil, il constitue le premier élément de la vision. L'œil en est le second.

Un troisième élément intervient : c'est l'objet qui réfléchit plus ou moins l'énergie provenant de la source. On a donc un triplet.



Pour mesurer la couleur des objets, les trois paramètres du triplet doivent être analysés : source – objet – observateur.

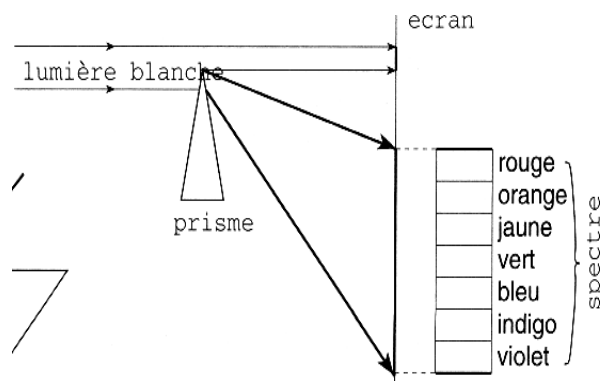
La conception de la couleur découle de la notion basée sur un triplet formé de :

- ♦ La source lumineuse qui éclaire l'objet
- ♦ L'objet que l'on observe
- ♦ l'œil et le cerveau de l'observateur

2.2 LA LUMIÈRE – LA SOURCE DE LUMIÈRE

2.2.1 Décomposition de la lumière par un prisme

Newton observa qu'en éclairant un prisme de verre avec de la lumière "blanche", celle-ci se décomposait en une bande multicolore identique à la répartition multicolore de l'arc en ciel.
(voir expériences en classe)



Cette décomposition de la lumière en radiations colorées met en évidence qu'une lumière blanche résulte de l'association d'un grand nombre de radiations colorées.

Cet ensemble de radiations visibles par l'œil est appelé spectre visible.
Il comprend : le violet , le bleu , le vert , le jaune , l'orange , le rouge.

De nombreux scientifiques et en particulier Louis de BROGLIE en 1924 ont démontré que les rayons lumineux sont des ondes électromagnétiques, de même que les rayons X (utilisés en radiographie) et les ondes radioélectriques. *Elles peuvent donc être définies par leur fréquence ou leur longueur d'onde.*

L'unité utilisée pour mesurer et identifier les longueurs d'onde de ces radiations lumineuses est le nanomètre. (Nanomètre = 1 milliardième de mètre = 10^{-9} m).

Le spectre visible occupe une très petite partie, dans le spectre total des vibrations électromagnétiques

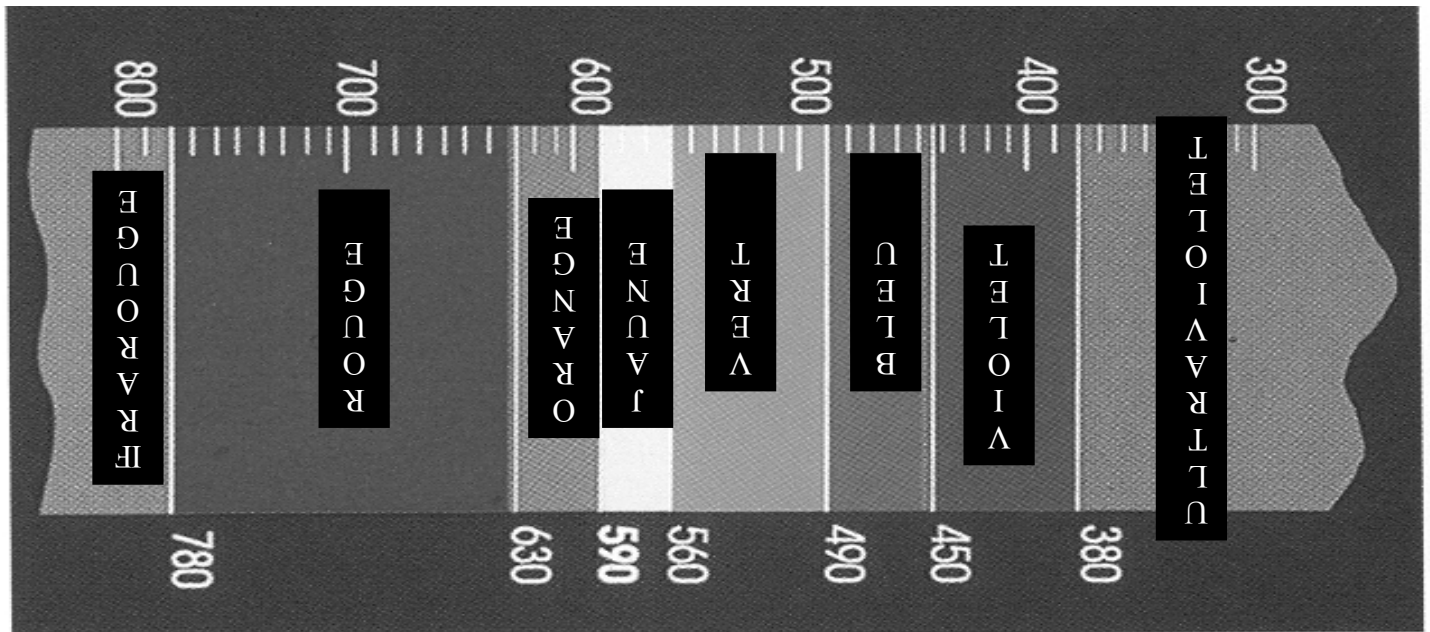
Le spectre visible est généralement considéré comme contenant des radiations électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre **380 et 780 nm**.

Ce spectre s'étale

- du violet à partir de 380 nm à 450 nm
- au bleu de 450 à 490 nm
- au vert de 500 nm à 570 nm
- au jaune de 570 nm à 590 nm
- à l'orange de 590 nm à 650 nm
- au rouge de 650 nm à 780 nm

A titre indicatif, la lumière jaune de 600 nm correspond à une fréquence de $5 \cdot 10^{14}$ Hz.

La notion de couleur est donc bien associée à la longueur d'onde, mais personne ne ressent le rouge comme étant le double du bleu en terme de longueur d'onde et la moitié en terme de fréquence.



4.2 LES SOURCES DE LUMIÈRE

Les sources de lumière constituent le premier élément du triplet.

La lumière peut être obtenue de différentes manières. En colorimétrie on réalise la création de lumière en chauffant une matière jusqu'à l'incandescence (filament d'une lampe par exemple) ou en excitant des atomes ou des molécules par l'intermédiaire d'un arc électrique ou d'une décharge électrique dans un gaz (lampe à arc dans un gaz).

La principale source lumineuse naturelle est le soleil. C'est sous cette lumière que nous observons, le plus souvent, les couleurs naturellement.

La lumière du jour est constituée de la lumière solaire directe et de celle diffusée par l'atmosphère. Il est à noter que la lumière solaire est influencée par la latitude, la saison, les conditions météorologiques, la pollution atmosphérique, l'heure... et ne pourra certainement être utilisée comme source de lumière objective

2.3 L'OBJET - LA MATIÈRE

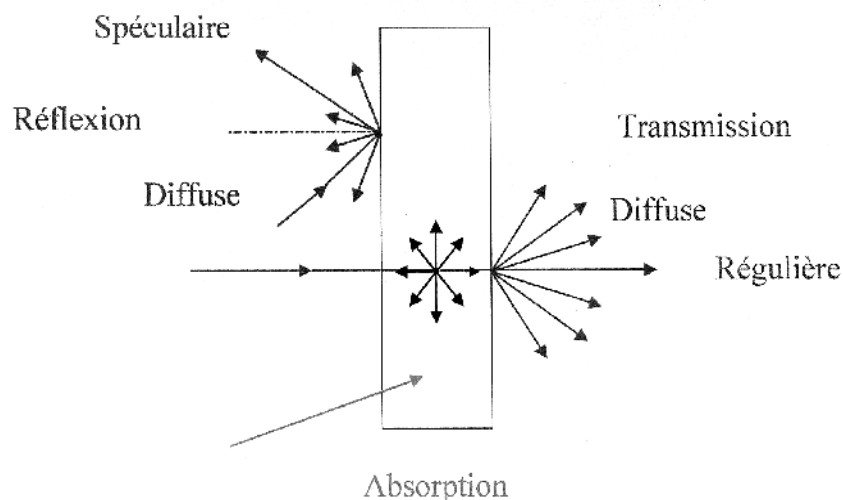
Le comportement de la lumière qui intervient sur des matières telles que les papiers, les textiles, les matières plastiques, les métaux, les céramiques, les cosmétiques, les produits alimentaires, est influencé par certains éléments physiques et chimiques.

2.3.1 Interaction de la lumière sur la matière

L'aspect d'un solide est liée à la manière dont il modifie la lumière qui le frappe.

Un faisceau lumineux frappant un corps peut donner lieu à 4 phénomènes :

1. ***L'absorption*** de la lumière par l'échantillon
2. ***La transmission*** : la lumière traverse l'échantillon
3. ***La réflexion*** : la lumière est réfléchiée sur la surface de l'échantillon dans une direction qui est telle que l'angle de réflexion est égale à l'angle d'incidence.
(réflexion spéculaire)
4. ***La dispersion*** : la lumière se réfléchit sur la surface dans toutes les directions



Les objets et les matières sont perçus par notre œil en fonction de la manière dont ils modifient la lumière qui les éclaire.

La matière a seulement la propriété de réfléchir plus ou moins certaines radiations lumineuses auxquels notre œil est sensible.

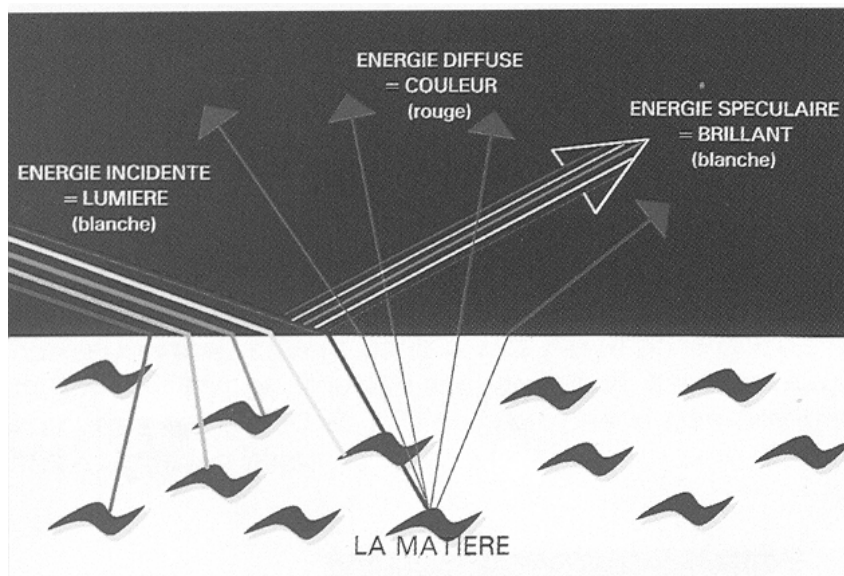
2.3.2 Exemple d'interaction de la lumière sur la matière

La couleur des objets

La lumière qui éclaire un objet sera modifiée par son interaction avec la matière de multiples façons et dans des directions diverses. La résultante de cette distribution de lumière nous donne l'impression visuelle que nous avons de ce produit.

(échantillon rouge)

L'absorption sélective de certaines radiations conduit à notre perception de la couleur.



Ainsi, un corps qui absorbe toutes les radiations nous apparaît noir et un corps qui les réfléchit toutes (et donc qui n'en absorbe aucune) nous paraît blanc.

Les radiations qui ne sont pas absorbées sont réfléchies ou transmissent par l'objet et donc visibles par les observateurs.

L'objet paraît rouge car de tous les rayons lumineux qui le touchent, seul le rouge est renvoyé vers l'œil.

Bien que l'apparence des différentes matières résulte de facteurs très complexes, le problème peut être simplifié par l'analyse séparée

des caractéristiques chromatiques (**la couleur**) et
des caractéristiques géométriques (**le brillant**) en

séparant l'énergie diffusée (couleur) par la matière, de l'énergie spéculaire (brillant).

Grâce à la séparation de ces deux types d'énergie, il est possible d'identifier chacune des composantes en choisissant l'appareil de mesure le plus adapté et la technique d'analyse appropriée.

2.4 L'ŒIL DE L'OBSERVATEUR

La perception visuelle est le résultat de l'interprétation faite par le cerveau, de la lumière perçue par les yeux, lumière modifiée et transmise par les objets ou directement émises par les sources de lumière.

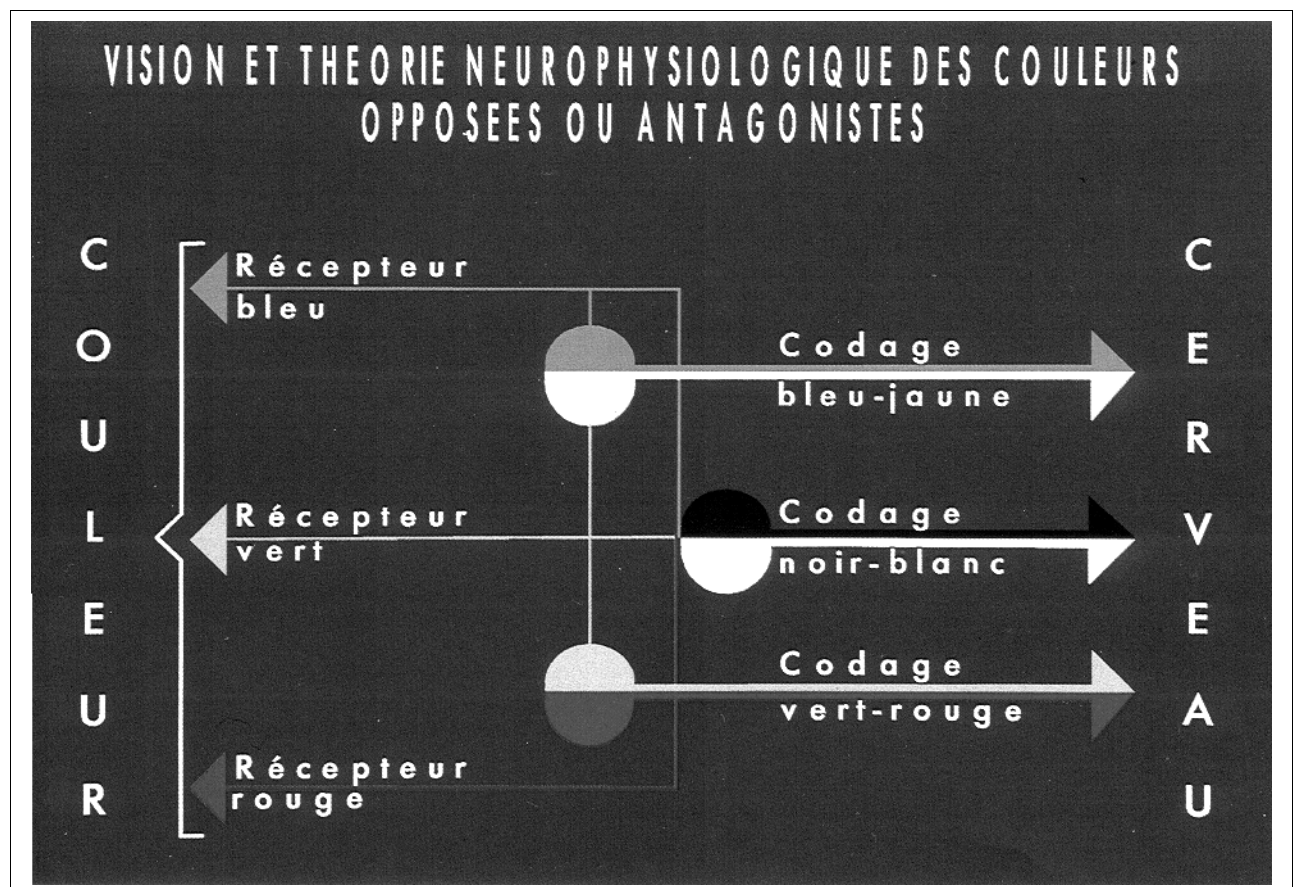
2.4.1 L'ŒIL - LA VISION DES COULEURS

L'œil n'est pas sensible de la même façon à toutes les radiations du spectre visible.

Une expérience simple montre qu'à partir de 3 projecteurs de lumières colorées (rouge – vert – bleu) , on peut créer une multitude de couleurs rien qu'en jouant sur l'intensité de chaque spot.

Sur base de cette expérience et à partir de manipulations réalisées sur les yeux de primates, on est arrivé aux conclusions suivantes :

La rétine est composée de trois types de récepteurs (les cônes) qui sont sensibles au bleu , au rouge et au vert mais la réponse de ces trois sortes de récepteurs est convertie entre l'œil et le nerf optique en trois autres séries de signaux dits, paires antagonistes ou opposées : Ces 3 paires étant du type [blanc / noir] , [rouge / vert] , [jaune / bleu]



3. La colorimétrie - Les espaces colorimétriques

La base scientifique de la mesure de la couleur est fondée sur l'existence des 3 groupes de signaux en provenance de l'œil d'un observateur humain. (voir « l'œil et la vision »)

Les espaces colorimétriques illustrent la possibilité de définir les couleurs des objets par des nombres, apportant de ce fait, un critère de classification objectif.

Ils permettent aussi de représenter et déterminer la différence entre des couleurs. Cette dernière propriété des espaces colorimétriques est appliquée à la définition de "l'acceptabilité" c'est à dire la propriété qui consiste à accepter dans une certaine fourchette de couleur, 2 échantillons différents.

Parmi la multitude d'espaces colorimétriques, il y en a un qui attirera notre attention : c'est l'espace **CIELAB**.

Pour le distinguer des autres espaces, tous ses paramètres sont affectés d'une étoile (* star) d'où le nom : **Ref LAB***

L'espace CIELAB est réservé à l'étude des couleurs de surface ou d'objets.

7.1 PROPRIÉTÉS DE L'ESPACE CIELAB

Il est basé sur le fait que toutes les couleurs peuvent être obtenues par la combinaison des paires : [blanc / noir] , [rouge/vert] , [jaune,bleu].

Toute couleur est représentée par 3 coordonnées [**L*** , **a*** , **b***]

L* représente la **clarté**

Noir (correspond au noir de fumée) → $L^* = 0$

Gris → $L^* = 50$

Blanc (correspond au blanc de l'oxyde de magnésium) → $L^* = 100$

a* représente la composante chromatique (Rouge-Vert)

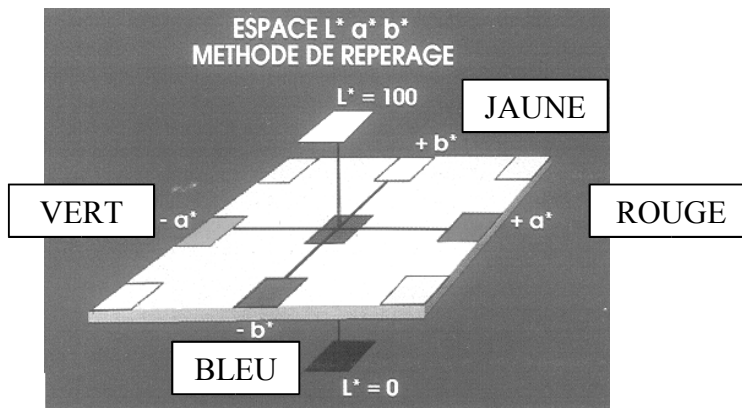
Une valeur positive de **a*** indiquant une localisation vers le rouge

Une valeur négative de **a*** une localisation vers le vert

b* représente la composante chromatique (jaune-Bleu)

Une valeur positive de **b*** indiquant une localisation vers le jaune ,

Une valeur négative de **b*** indiquant une localisation vers le bleu

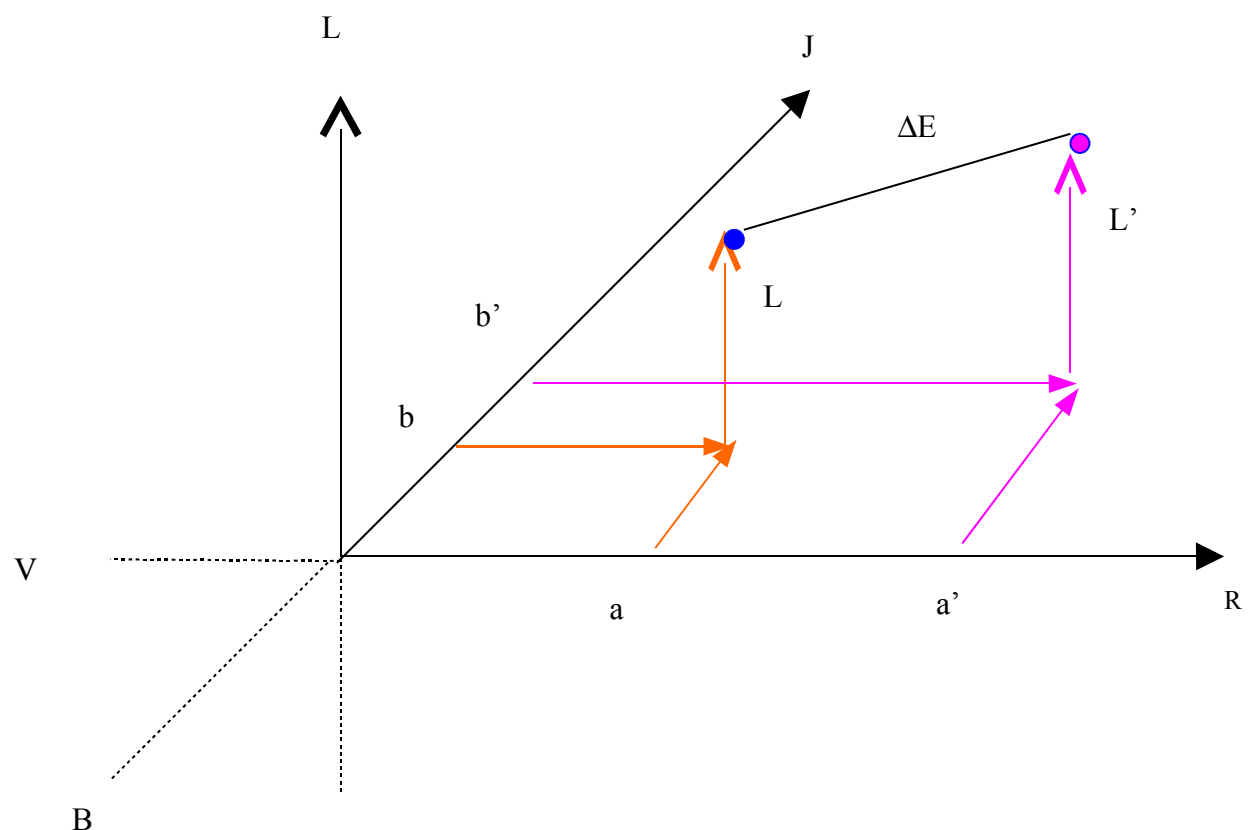


Les composantes (a^* , b^*) définissent le plan de chromaticité. (c'est à dire le plan de couleur).

7.2 DIFFÉRENCE DE COULEUR

La recherche d'un espace de couleur uniforme a aussi pour but de permettre l'évaluation des différences de couleur par la mesure de la distance qui les sépare.

Ainsi la distance ΔE entre deux points sera calculée par une relation à 3 dimensions et sera appelé "écart colorimétrique"



Supposons que la couleur de référence ou "standard" soit représentée par le point (L, a, b).

Supposons que la couleur d'un échantillon soit représentée par le point (L', a', b')

Alors on peut dire qu'il existe une différence de couleur entre les 2, si les 2 points représentatifs des couleurs ne sont pas identiques.

L'écart de couleur étant d'autant plus grand que les points sont séparés par une grande distance ΔE dans cet espace.

L'écart colorimétrique ΔE entre 2 couleurs sera décomposé suivant les 3 composantes principales : $[\Delta L, \Delta a^*, \Delta b^*]$

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

Dans l'industrie, l'utilisation de la formule ΔE sont très important pour l'évaluation de la tolérance et de l'acceptabilité des produits finis par rapport au produit de référence (par exemple celui demandé par le client).

Exemple : n'accepter les produits finis pour lesquels $\Delta E \leq 1$ car dans ce cas l'œil ne distingue la différence de couleur entre les 2 échantillons.

8. Le colorimètre

La couleur se mesure avec un colorimètre.

Les colorimètres en donnent une valeur absolue et/ou la différence de couleur entre un échantillon de référence et un échantillon à contrôler.

Ils sont principalement utilisés en contrôle-qualité pour déterminer la conformité aux standards et vérifier les tolérances définies.

Le principe de l'appareil est "simple". ***Il analyse, longueur d'onde par longueur d'onde l'énergie lumineuse réfléchie ou transmise par un échantillon qui est éclairé par le colorimètre lui-même dans lequel il y a une lampe. (au xénon, halogène)***

Le triplet SOURCE, OBJET, et OBSERVATEUR se retrouve dans la mesure colorimétrique, l'instrument jouant à la fois les rôles de source et d'observateur.

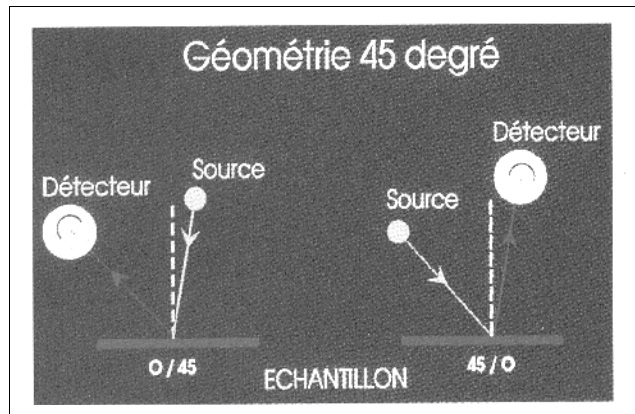
Une unité de traitement électronique remplace le « cerveau » de l'observateur.

Un porte échantillon positionne l'objet et une géométrie de mesure appropriée déterminent comment l'échantillon est éclairé et observé par l'équipement de mesure.

La géométrie de mesure définit les angles d'illumination de l'échantillon et d'observation de l'appareil de mesure.

Il existe deux géométries fréquemment utilisées: la géométrie 45/0° (ou 0°/45°) et la géométrie DIFFUS/O°.

a) Les appareils à géométrie $45^\circ/45^\circ$ éclairent l'échantillon sous un angle de 45° et la surface

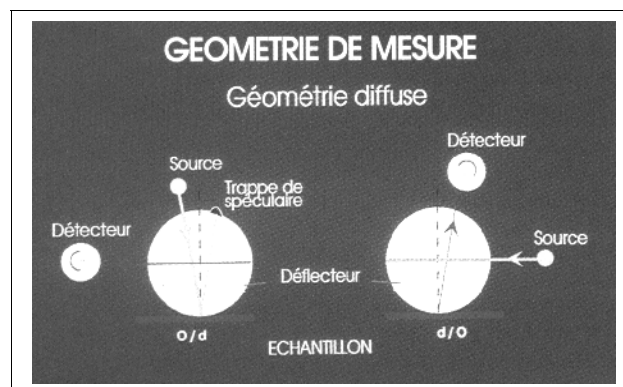


appareils à géométrie l'échantillon sous un mesurent à la normale de (l'inverse pour le $0^\circ/45^\circ$).

Les systèmes de mesure à géométrie $45^\circ/45^\circ$ analysent l'énergie lumineuse diffuse uniquement en réflexion et, d'une manière générale, observent l'objet dans les conditions similaires à l'observation naturelle des couleurs et des objets par l'homme.

Cela signifie que l'équipement de mesure analyse uniquement la couleur de l'échantillon causée par la matière colorante présente dans l'objet (sans le brillant).

b) Les équipements de mesure à géométrie DIFFUS/ 0° illuminent les échantillons d'une manière diffuse et les observent sous 8° d'angle.



La composante d'énergie spéculaire (le brillant) est typiquement incluse dans la mesure, ce qui veut dire que la mesure comprendra la couleur due à la matière colorante présente dans l'échantillon, ainsi que le brillant de l'objet lié aux caractéristiques physiques et géométriques de l'échantillon (état de surface).

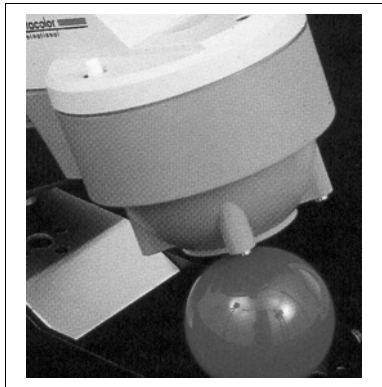
La plupart des appareils à géométrie DIFFUS/ 0° offre la possibilité de pratiquer également des mesures en transmission pour des échantillons transparents ou translucides.

D'autre part, cette géométrie est souvent équipée d'un dispositif permettant d'éliminer la composante d'énergie spéculaire (spéculaire exclu = brillant exclu).

Conclusion

Dans les dix dernières années, des progrès significatifs ont été faits dans la conception et la fabrication de l'instrumentation de mesure colorimétrique. Si l'on compare les appareils

modernes aux appareils anciens, les équipements actuels permettent des mesures plus stables, plus reproductibles et plus précises. Ils offrent plus de possibilités d'analyse d'échantillons divers, plus de flexibilité pour le traitement de l'information, une utilisation plus simple et bien souvent à moindre coût !



8.1 LE COLORIMÈTRE « L'ULTRASCAN DE HUNTERLAB »

L'appareil utilisé au laboratoire est l'Ultrascan de Hunterlab

Il permet entre autres les mesure de a^* , b^* , L^* ainsi qu'un indice appelé « indice de jaune ».

La mesure de cet indice noté Y_i est particulièrement bien adapté pour évaluer la dégradation (jaunissement) des plastiques exposés à la chaleur, à la lumière ou à tout autre environnement.

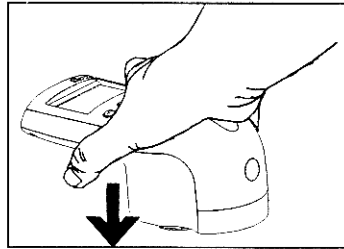
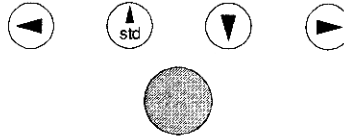
Un valeur positive de Y_i traduit une tendance au jaunissement alors qu'une valeur négative traduit une tendance au bleuissement de l'échantillon.

1. mode opératoire de base du colorimètre

L'appareil « Gardner » nécessite une configuration qu'il est toujours opportun de vérifier avant une manipulation sous peine de mesurer n'importe quoi.

A l'ouverture de l'appareil, vous avez un menu

Fichier	Affich.	Option
Echant.		
L*	92.45	ΔL^* 0.04
a*	0.46	Δa^* 0.01
b*	-1.55	Δb^* 0.03
D65/10°		ΔE^* 0.05



1. Etalonnage de l'appareil

- **Faire un étalonnage complet**
- **Faire l'étalonnage « échantillon vert »**

dans le menu « option »

Fichier	Affich.	Option
Ech.Coul.	▶	
Indice	▶	
Brillant	▶	
Illumin.	▶	
Etalonner	▶	Cont.vert
Menu	▶	Etalonner
Config.	▶	

2. Vérifier si les options suivantes sont sélectionnées

Ech couleur	➔	Cielab
Indice	➔	Yi 313 ou Δ
Brillant	➔	Brill.On
Illuminant	➔	D65/2°
Etalonner	➔	-
Menu	➔	Mem.Auto
Config	➔	Avancée

3. dans « Affich. » sélectionner différence Ech/diff.

4. dans « Fichier » sélectionner sauvegarde ➔ Ech→etal

ensuite faire la mesure sur le premier échantillon qui sera pris comme référence pour mesurer les écarts de couleurs des échantillons suivants

l'appareil donne

à gauche les valeurs L^* , a^* , b^* , Y_i , de l'échantillon en cours

à droite les Δ par rapport à la référence ou étalon

Réaliser des mesures absolues sur échantillons de couleur pris dans un atlas colorimétrique et placer les sur un diagramme (L^* , a^* , b^*) à 3 dimensions.

(exemples : prendre des teintes dans le brun, bleue, rouge, vert,.....)

8.2 MANIPULATIONS DE COLORIMÉTRIE

Les manipulations de colorimétrie nécessitent l'utilisation d'un colorimètre qu'il faudra étalonner à chaque expérience.

- étalonnage complet (étalons blanc / noir)
- étalonnage journalier (étalon vert)

MANIPULATION 1 (EXP SUR LES POUDRES DE PVC)

☺ *Montrer l'effet du temps de chauffe sur la coloration du PVC*

1. *Fabriquer quelques coupelles remplies de PVC tassé, dont la surface est "lissée mécaniquement" :*
2. Disposer ces coupelles - sauf une qui servira de référence - dans une étuve vers 80°C.

Attention: surveiller la dégradation! Ne pas aller jusqu'à l'émission de fumées acides!

3. Les retirer à des temps connus, p. ex. 10', 15', 20', 25' etc.

A l'aide du colorimètre,

- Mesurer les valeurs colorimétriques du PVC de référence
- Mesurer les ΔE des différents PVC ayant séjournés dans le four par rapport à la coupelle de référence.

N.B. : placer une plaque de verre blanc (plaque pour préparation de microscopie) sur les surfaces de PVC à mesurer de manière à éviter la pénétration de poussières de PVC dans la tête de mesure du colorimètre !

4. Tracer le diagramme $\Delta E = f(t)$.

S'interroger quant à l'information qu'on peut extraire du diagramme, comme p. ex.

* l'effet du temps est-il constant? (un même laps de temps à chaud a-t-il le même impact sur ΔE quel que soit le temps déjà écoulé à chaud ?) [accélération du phénomène de coloration visible via la dérivée)

*simulation numérique selon les standards Excel et établissement de l'équation correspondante; calcul et représentation de la fonction dérivée

Tracé de diagrammes sous Excel.

Signaler que le phénomène n'a pas lieu à température ambiante: il faut une "énergie d'activation" pour initier la réaction de ZIP, donc une température minimale en dessous de laquelle le phénomène est "infiniment lent".

5. Suivant les conditions précédentes, fabriquer un lot de PVC dégradé thermiquement.

Réaliser quelques mélanges de PVC de référence et de PVC dégradé, p. ex. dans un sac en plastique. Les présenter simplement numérotés, comme s'il s'agissait de lots de PVC à réceptionner.

Utilisation de la balance et des calculs de proportions + exemples concrets.

Mesurer les ΔE de ces mélanges par rapport au PVC de référence.

Se donner un ΔE maximum et répondre à la question: quels lots devraient-ils être écartés de la mise en œuvre pour non respect de la " norme ΔE " ?

Possibilité: Un groupe fabrique les " lots ", un autre réalise les mesures ; remise en commun des résultats, présentations. .. discussions.

Souligner l'importance de bien repérer les mesures effectuées ; si possible faire préparer des feuilles de saisies des données, voir exemple en annexe.

Date :

ARC – Section plasturgie

Sélection de lots de PVC destinés à la mise en œuvre.

Opérateur :
 Origine des échantillons :
 Appareillage : Colorimètre Gardner – Source : D 65 / 10 °
 Feuille de travail :
 Etalonnage : OK pas OK
 Remarque :

Résultats.

N° du lot	ΔE