

Cours 1 MIVI - Image couleur

- Formation de la couleur
- Perception de la couleur
- Elements de colorimétrie
- Représentation de la couleur
- Acquisition d'une image couleur

Capture de l'information couleur *les systèmes d'acquisition*

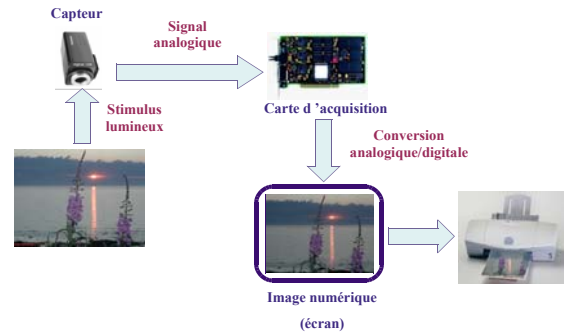


Image numérique et contrôle de l'aspect visuel

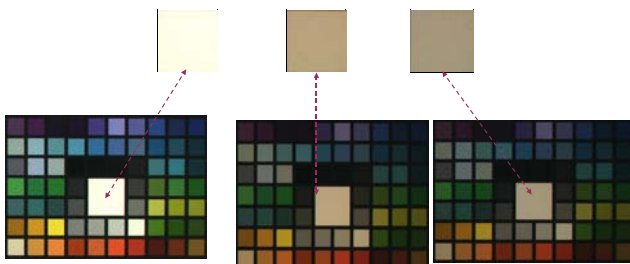
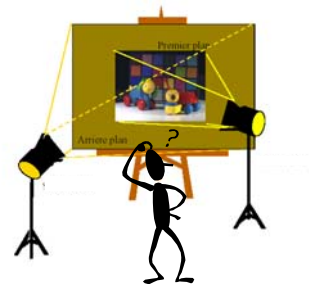


Image partielle de la mire de référence pour photo numérique de GretagMacbeth

Un même objet a été photographié dans trois conditions d'éclairage différentes

Sources de l'image

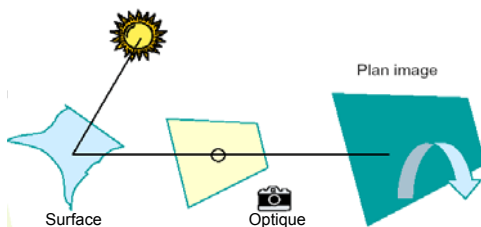
Le triplet "lumière-objet-observateur"



4

Sources de l'image

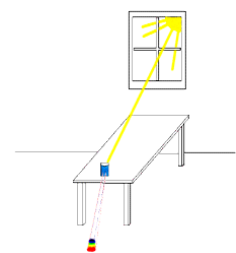
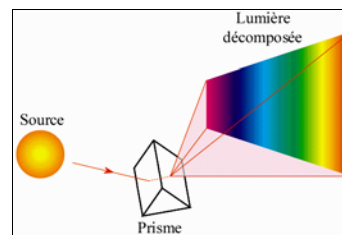
Lumière-scène-image



5

3 observations fondamentales

1
la lumière blanche est
décomposée par le premier prisme



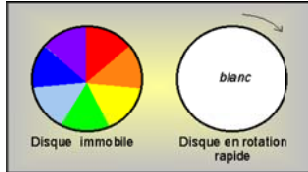
'light is a heterogeneous mixture
of differently refrangible rays'

3

La somme des rayonnements monochromatiques reconstitue la lumière blanche



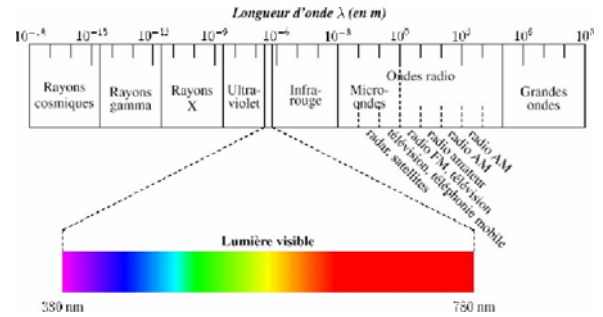
violet - indigo - bleu - vert - jaune - orange - rouge



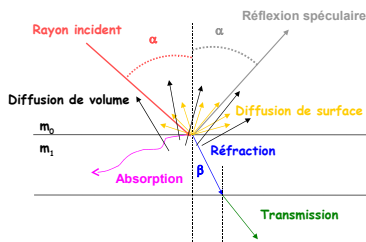
analogie *arbitraire* avec les 7 notes de la gamme

pas de rapport simple entre les fréquences (\neq octave)

La lumière

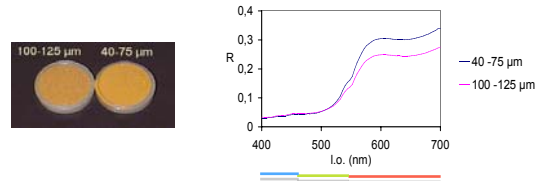


Interaction lumière-matière

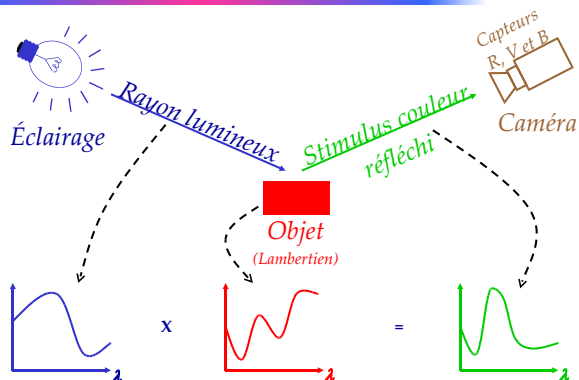


Réflectance spectrale

Même produit – broyage différent

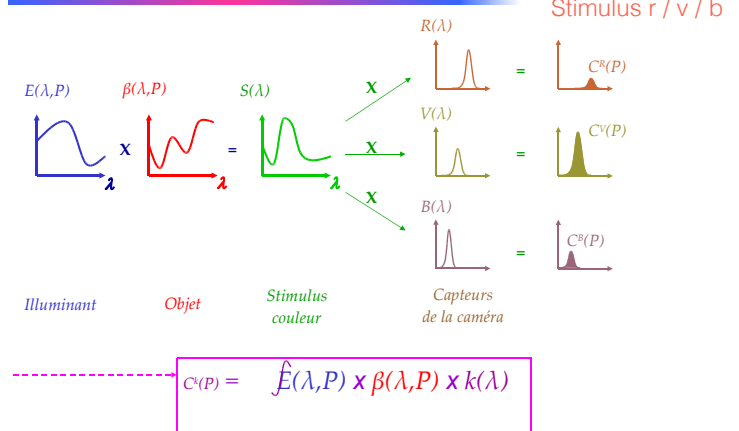


Processus de formation de la couleur d'un pixel



11

Processus de formation de la couleur d'un pixel



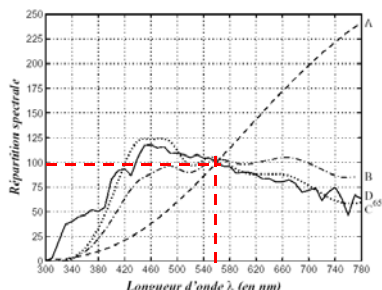
12

Formation des images (suite)

Illuminants

Multitude de sources de lumière (lumière du jour, lumière du soleil, éclairages artificiels)

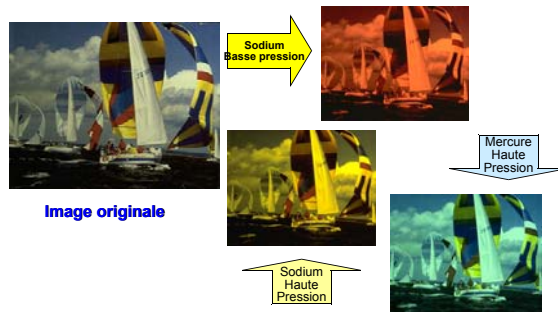
La CIE a normalisé plusieurs illuminants et familles d'illuminants



13

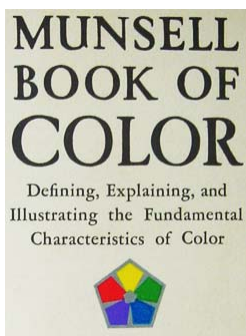
Formation des images

Perception des couleurs



Source : Georges Zissis, CPAT - U. Toulouse III

14



Formation des images (suite)

D'ailleurs...

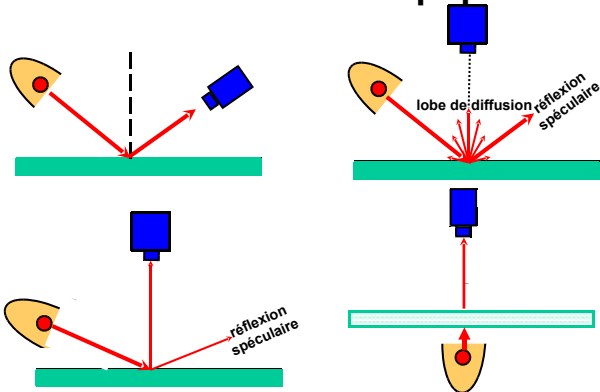


☞ Correction chromatique

D'après M. Chambah, Univ. Reims

16

Eclairages spéculaire, diffus, « black field » et diascopique



Formation des images (suite)

Influence de la géométrie d'éclairage



- (a) Éclairage direct, non homogène, générant des surbrillances (par réflexion spéculaire) et des ombres.
- (b) Éclairage indirect, plus uniforme, mais de moins bon rendu, générant une perte de saturation pour certaines couleurs (par absorption d'énergie).

18

Image numérique et contrôle de l'aspect visuel (6)

Colorimétrie

Espace virtuel :

Illuminant standard

Observateur standard

Données acquises :

valeurs « moyennes » pour la surface observée

Acquisition d'images couleur

Prise de vue :

Illuminant réel

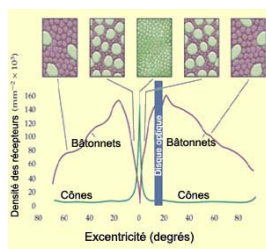
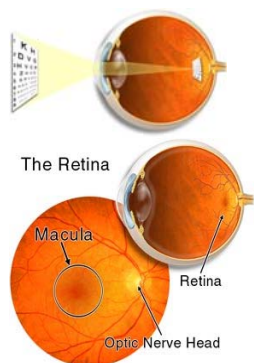
Observateur = système d'acquisition (non normalisé)

Données acquises :

NXM jeux de trois valeurs

Perception de la couleur

Le fonctionnement de l'œil



Perception des couleurs – les cônes

Sensibilité maximale

S : 440 nm

M : 535 nm

L : 565 nm

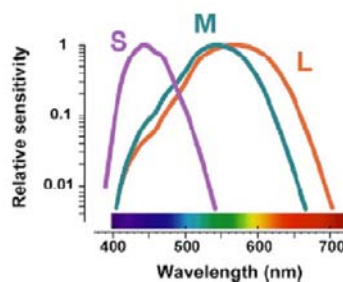
• Trois familles de cônes L, M, S (et non R, G, B)

• Large recouvrement des sensibilités des cônes L et M (30 nm)

• Proportions relatives L:M très variables ~ 0.25:01 à 9:1 (Roorda & Williams, 1999)

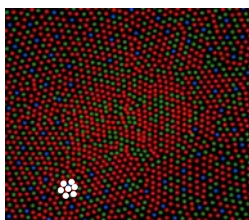
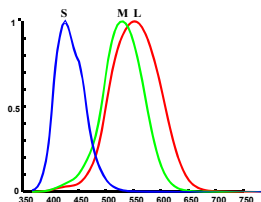
• Variation importante de la taille, de la densité optique des cônes entre fovéa et périphérie

• Cônes S absents des 20° centrales, disposition selon un maillage parcimonieux (~10 %) et régulier



The relative sensitivities of the Short- (S), Middle- (M), and Long- (L) wavelength sensitive cones as a function of wavelength. Each curve was normalized to its maximum. The curves show the cones sensitivity profiles derived by Stockman & Sharpe (2000).

Mosaïque de cônes



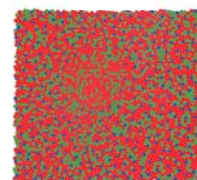
Répartition spatiale des cônes

✖ 7% de cônes S. Pas de cône S dans la partie centrale (0,34°)

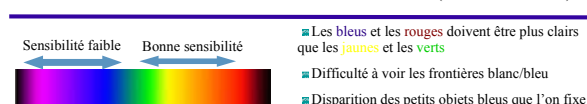
✖ Cônes L / Cônes M = 1,5

✖ Cônes L et M répartis de façon aléatoire

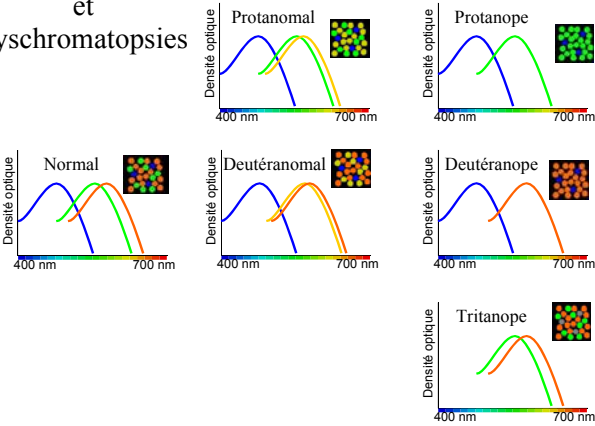
✖ Cône S répartis régulièrement



Répartition des différents types de cônes dans la fovéa (150 000 cônes/ mm2)

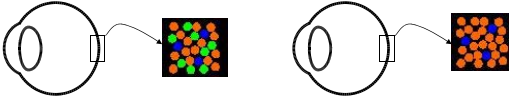


Vision normale et dyschromatopsies



Un signal d'entrée déficient chez les daltoniens

- dans la rétine normale, la lumière génère trois signaux un par famille de cônes : L, M, S
- dans la rétine du sujet dichromate, la lumière génère deux signaux



$$\begin{aligned} L_1 &= L_2 \\ M_1 &\neq M_2 \\ S_1 &= S_2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} L_1 &= L_2 \\ S_1 &= S_2 \end{aligned}$$

Elements de colorimétrie

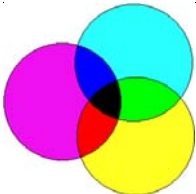
Mélanges additifs et soustractifs



Combinaison de rayons lumineux (émission)

mélange additif
 $\Sigma \lambda = \text{blanc}$

Télévision
rouge - vert - bleu



Combinaison de pigments (absorption)

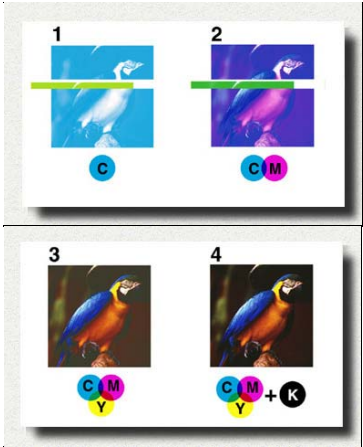
mélange soustractif
 $\Sigma \lambda = \text{noir}$

Imprimerie
cyan - magenta - jaune

J.C. Le Blon
3 couleurs
(rouge, jaune, bleu)

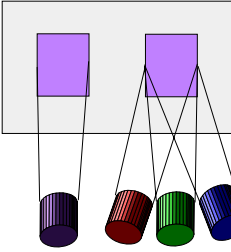


Imprimerie moderne
cyan - magenta - jaune
+
noir

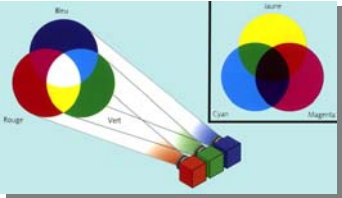


- Trivalance de la perception des couleurs chez l'homme.

Expérience d'égali



$$\text{Equivalence } [W] = r[R] + g[G] + b[B]$$



- Trivalance de la perception des couleurs chez l'homme.

Expérience d'égalisation visuelle

Loi de Grassman

Symétrie

$$[A]=[B] \Rightarrow [B]=[A]$$

Transitivité

$$[A]=[B], [B]=[C] \Rightarrow [A]=[C]$$

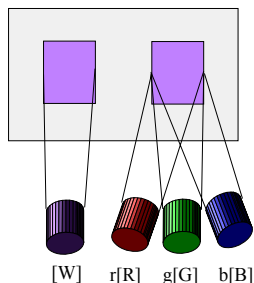
Proportionalité

$$[A]=[B] \Rightarrow k[A]=k[B]$$

Additivité

$$[A]=[B], [C]=[D] \Rightarrow [A]+[C]=[B]+[D]$$

→ Espace Vectoriel



$$[W] = r[R] + g[G] + b[B]$$

Equivalence $[W] = r[R] + g[G] + b[B]$

La trivariance visuelle

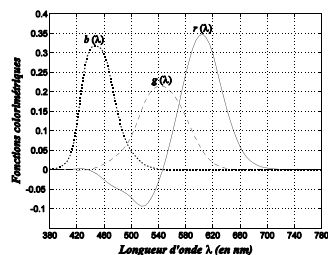


Simulation de la réponse des cônes : L (440 nm), M (545 nm) et S (580 nm)



Les différents systèmes de primaire

Le système RGB CIE 1931 est défini à partir de trois primaires monochromatiques : 700 nm, 546.1 nm et 435.8 nm (**Guild et Wright**). Il traduit le comportement de l'observateur de référence CIE 1931 à 2°.



$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} r(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} g(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} b(\lambda) d\lambda$$

Les quantités unitaires ont été normalisées de que leur mélange unitaire soit équi-énergétique. Ces 1,0000 pour R,

$$E(\lambda) = 1 = r(\lambda).R + g(\lambda).G + b(\lambda).B$$

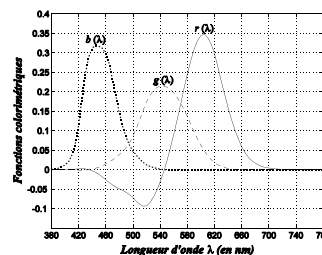
Fonctions colorimétriques du système de primaires RGB de l'observateur de référence CIE 1931 à 2°.

Nb. La courbe $r(\lambda)$ présente une partie négative, ce qui contredit le principe de la synthèse additive, d'où :

$$S(\lambda) + r(\lambda) R \equiv g(\lambda) G + b(\lambda) B \Rightarrow S(\lambda) \equiv -r(\lambda) R + g(\lambda) G + b(\lambda) B$$

Les différents systèmes de primaires

Le système RGB CIE 1931 est défini à partir de trois primaires monochromatiques : 700 nm, 546.1 nm et 435.8 nm (**Guild et Wright**). Il traduit le comportement de l'observateur de référence CIE 1931 à 2°.



$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} r(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} g(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} b(\lambda) d\lambda$$

Les quantités unitaires ont été normalisées de que leur mélange unitaire soit équi-énergétique. Ces 1,0000 pour R,

$$E(\lambda) = 1 = r(\lambda).R + g(\lambda).G + b(\lambda).B$$

Fonctions colorimétriques du système de primaires RGB de l'observateur de référence CIE 1931 à 2°.

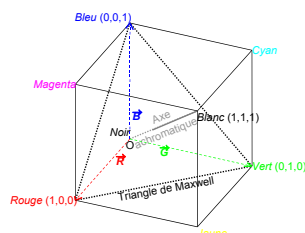
Nb. La courbe $r(\lambda)$ présente une partie négative, ce qui contredit le principe de la synthèse additive, d'où :

$$S(\lambda) + r(\lambda) R \equiv g(\lambda) G + b(\lambda) B \Rightarrow S(\lambda) \equiv -r(\lambda) R + g(\lambda) G + b(\lambda) B$$

Systèmes (R,G,B)

- Cube des couleurs

- Les primaires correspondent à des vecteurs
- Les composantes trichromatiques sont les coordonnées d'un point

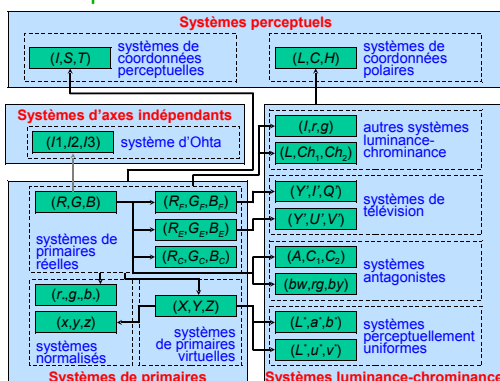


Systèmes (R,G,B)

- Inconvénients des systèmes (R,G,B)

- Valeurs négatives des composantes trichromatiques
- Valeurs des composantes trichromatiques liées à la luminance et corrélées
- Multitude de systèmes (R,G,B)
 - Pour les écrans à tubes cathodiques ou LCD
 - Pour la colorimétrie (observateur de référence)
 - Pour les caméras
 - Pour les scanners
 - Pour les imprimantes (modèle CMYK)

Espaces couleur et Classification



37

Les coordonnées trichromatiques RGB

Aux trois primaires R, G, B on peut faire correspondre trois vecteurs directeurs normés, lesquels vecteurs forment alors un espace vectoriel à trois dimensions, appelé l'espace RGB, d'origine O.

Toute couleur peut alors être décrite par :

$$\vec{C} = R.\vec{R} + G.\vec{G} + B.\vec{B}$$

Les coordonnées trichromatiques RGB s'expriment alors de la façon suivante :

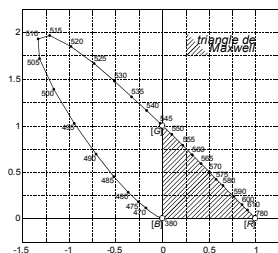
$$R = \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} C(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda, \quad G = \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} C(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

$$B = \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} C(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

Systèmes (R,G,B)

- Diagramme de chromaticité
 - Composantes normalisées ou coordonnées trichromatiques (ou réduites)

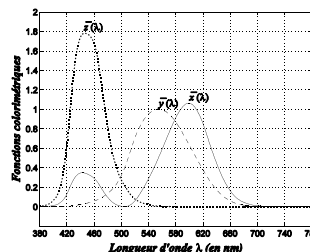
$$\begin{cases} r = \frac{R}{R+G+B} \\ g = \frac{G}{R+G+B} \\ b = \frac{B}{R+G+B} \end{cases}$$



Deux stimuli de même chrominance, mais de luminances différentes, peuvent avoir des coordonnées trichromatiques différentes.

Les différents systèmes de primaire

Les systèmes de primaire XYZ CIE 1931 (à 2°) et XYZ CIE 1964 (à 10°)



$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \bar{x}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \bar{y}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7690 & 1.7518 & 1.1300 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Fonctions colorimétriques du système de primaire XYZ de l'observateur de référence CIE 1931 à 2°.

Nb. Y représente explicitement la luminance de la couleur.

Les coordonnées trichromatiques XYZ

Aux trois primaires X, Y, Z on peut faire correspondre trois vecteurs directeurs normés, lesquels vecteurs forment alors un espace vectoriel à trois dimensions, appelé l'espace XYZ, d'origine O.

Toute couleur peut alors être décrite par :

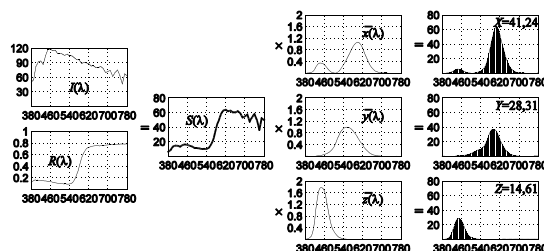
$$\vec{C} = X.\vec{X} + Y.\vec{Y} + Z.\vec{Z}$$

Les coordonnées trichromatiques XYZ s'expriment alors de la façon suivante :

$$X = \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} C(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} C(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} C(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Les coordonnées trichromatiques XYZ



Exemple : calcul des coordonnées trichromatiques d'une couleur C(λ) produit de la réflectance d'une source I(λ) et une surface R(λ). Dans cet exemple, k = 0,009463.

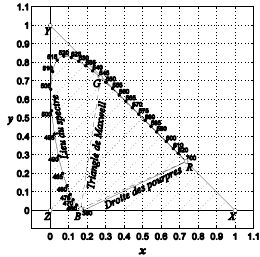
Le diagramme de chromaticité xyY

La normalisation des coordonnées XYZ donne :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Etant donné que $x + y + z = 1$, la transformation inverse est donnée par :

$$X = x \cdot \frac{Y}{y} \quad Z = (1 - x - y) \cdot \frac{Y}{y}$$



Représentation du diagramme de chromaticité à Y constant.

- La chromaticité correspond à la projection des coordonnées XYZ sur le plan de chromaticité xy.
- L'axe perpendiculaire à ce plan est l'axe des luminances Y.
- Domaine des couleurs reproductibles par synthèse additive des trois primaires XYZ (en pointillé RGB).
- Domaine des couleurs du visible (courbe des couleurs pures et droite des pourpres).

Diagramme de chromaticité CIE (1931)

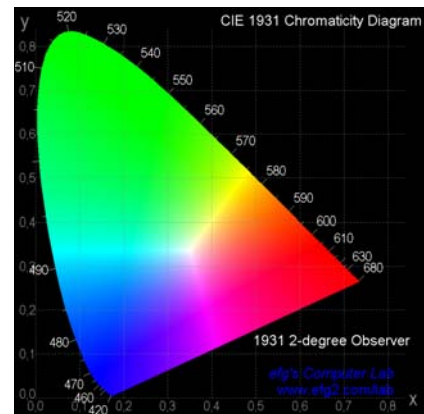
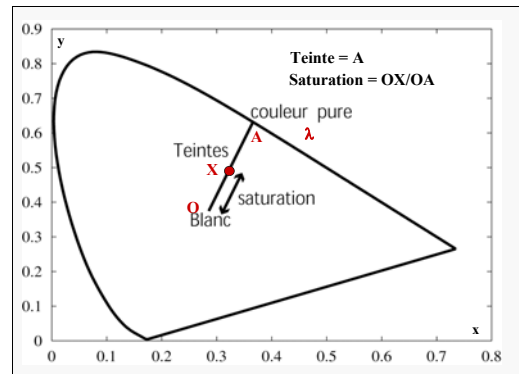
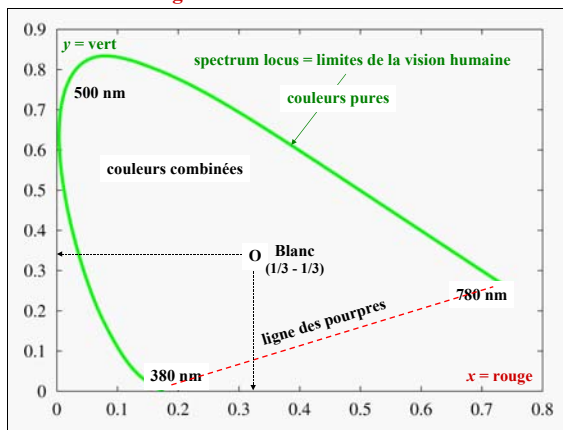


Diagramme de chromaticité



Une couleur est définie par ses 2 coordonnées chromatiques (x, y) et sa luminance Y

Les systèmes de télévision

• Origines

- Les téléviseurs noir et blanc doivent pouvoir recevoir en noir et blanc les émissions en couleur.
- Les téléviseurs couleurs doivent pouvoir recevoir en noir et blanc les émissions en noir et blanc.
- Nécessité de séparer l'information de chrominance de l'information de luminance pour la transmission des signaux de télévision.

Les systèmes de télévision

• Le système (Y', I', Q')

- Il correspond à la norme américaine NTSC (National Television Standards Committee)
- Les primaires sont fixées par la FCC (Federal Communications Commission)
- Les primaires sont gamma corrigées avec $\gamma = 2,2$
- Le blanc de référence est l'illuminant C

$$\begin{bmatrix} Y' \\ I' \\ Q' \end{bmatrix} = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} R'_F \\ G'_F \\ B'_F \end{bmatrix} \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,212 & -0,523 & 0,311 \end{bmatrix}$$

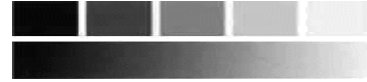
Les systèmes de télévision

- Le système (Y', U', V')
 - Il correspond à la norme européenne EBU (European Broadcasting Union ou Union Européenne de Radio-télévision (UER))
 - Les primaires sont fixées par cette norme
 - Les primaires sont gamma corrigées avec gamma = 2,8
 - Le blanc de référence est l'illuminant D_{65}

$$\begin{bmatrix} Y' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} R'_E \\ G'_E \\ B'_E \end{bmatrix} \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,148 & -0,289 & 0,437 \\ 0,615 & -0,515 & -0,100 \end{bmatrix}$$

La couleur, c'est quoi ?

- Clarté



- Teinte



- Saturation

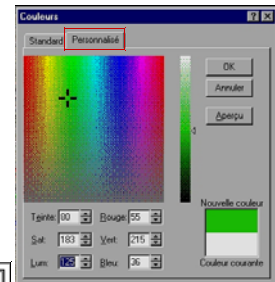
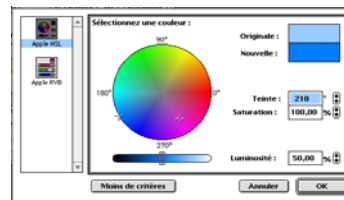


- Il faut trois quantités pour caractériser complètement une couleur !
- Dans la pratique, ces paramètres sont liés, et il n'est pas toujours facile de les distinguer.

L'espace TSL

Teinte
Saturation
Luminosité

plus proche de la sensation physiologique

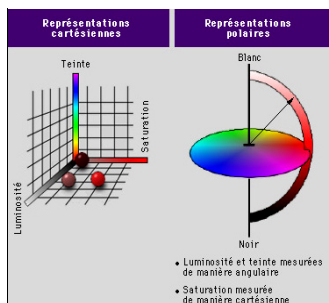


la couleur est représentée dans un système de 3 coordonnées
teinte - saturation - luminosité

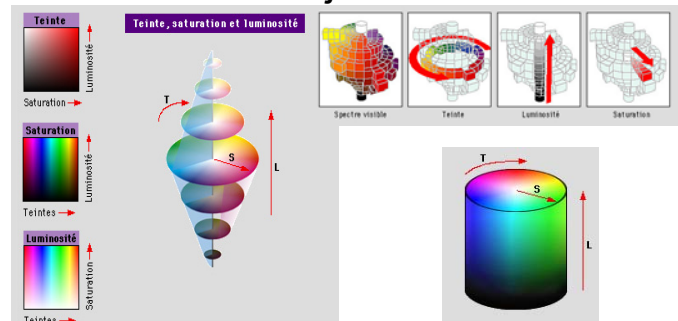
Teinte
longueur(s) d'onde correspondante(s)

Saturation
mélange avec du blanc
rouge ≠ rose
une couleur saturée n'est pas
mélangée avec du blanc

Luminosité
intensité lumineuse reçue par l'œil



La couleur des objets



Atlas de Munsell (1915)

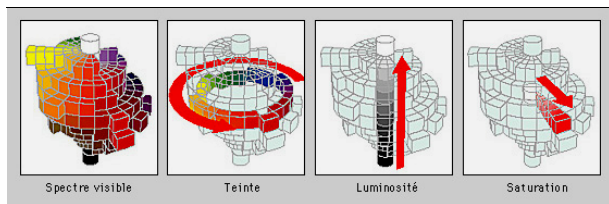
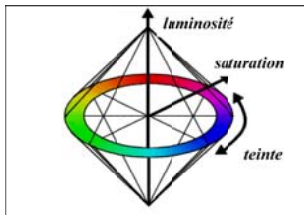
Méthode systématique d'identification des couleurs en fonction de 3 paramètres

Teinte : cercle horizontal

Luminosité : axe vertical

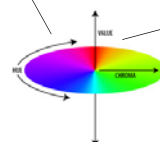
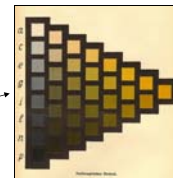
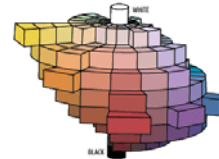
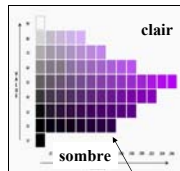
clair en haut, sombre en bas

Saturation : du centre vers l'extérieur

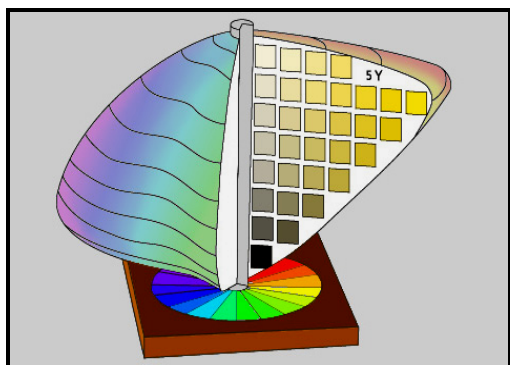


Atlas de Munsell (1915)

ensemble de planches 2D obtenues par coupe 3D



Arbre de Munsell



Atlas de Munsell

- A partir d'estimations « d'équidistance perceptive », subdivision fine de la roue des couleurs donnant les pages de l'atlas :

Une page = 1 teinte ou « Hue »

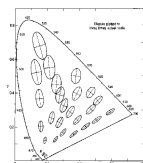
Actuellement : environ 1500 échantillons dans l'atlas

Un coloriste expérimenté distingue environ 10^6 couleurs !!



Système CIELAB₇₆

L'espace ainsi obtenu n'est toujours pas pourvu d'une métrique homogène, comme le montre le diagramme des seuils de perception :



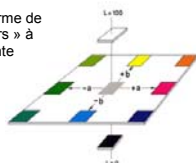
Après plusieurs tentatives une transformation non linéaire est couramment adoptée :

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16$$

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

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

Qui redonne une forme de « solide des couleurs » à peu près satisfaisante



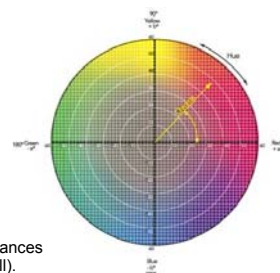
Ce système est conçu pour caractériser la couleur des objets observés en réflexion (mode objet) sous un *illuminant standard*. Par construction on a $L^* = 100$ $a^* = 0$ $b^* = 0$ pour tenir compte des effets d'adaptation.

On définit la chroma :

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

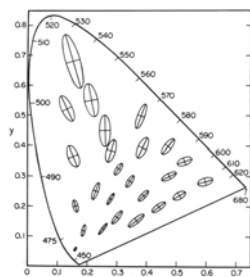
et l'angle de teinte :

$$h = \arctan(b^* / a^*)$$



- la métrique correspond mieux aux distances colorimétriques perçues par l'œil (Munsell),
- est couramment adopté par les professionnels de la couleur.

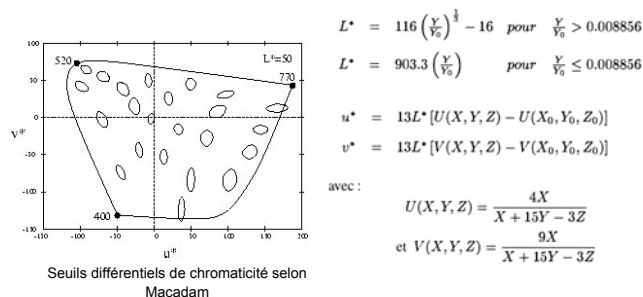
La sensibilité visuelle aux écarts de chromaticité



Seuils différentiels de chromaticité selon Macadam (agrandies 10 fois).

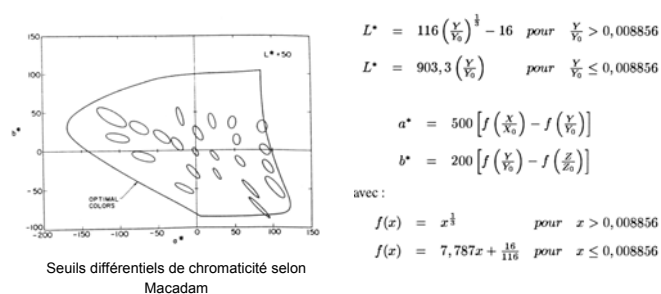
Tandis que le rapport de longueur du grand axe sur le petit axe tend jusqu'à 15:1, ce rapport vaut en moyenne 3,12 avec un écart type de 1,03.

Vers une uniformisation des différences de couleur L'espace L*u*v*



Ecole d'Hiver sur l'Imagerie Couleur – Lille 2005

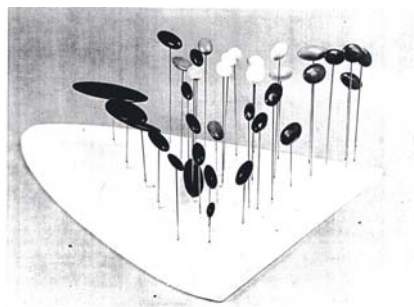
Vers une uniformisation des différences de couleur L'espace L*a*b*



Ecole d'Hiver sur l'Imagerie Couleur – Lille 2005

Vers une uniformisation des différences de couleur L'espace L*a*b*

L'étude conjointe de la luminance avec la chromaticité a permis d'obtenir des ellipsoïdes dont les dimensions varient en fonction du niveau de luminance.



Ellipsoïdes de MacAdam

L'orientation et la taille des ellipses varie suivant le niveau de luminance.

Acquisition d'une image couleur

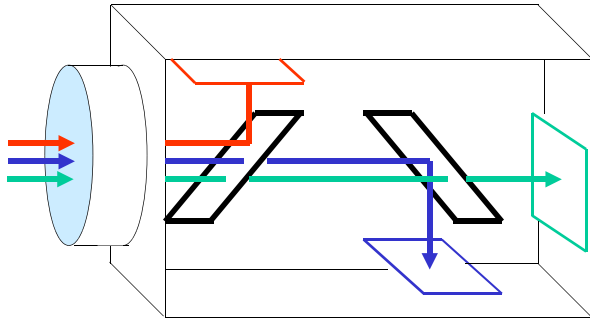
Introduction

- L'espace des couleurs est tridimensionnel

Une image couleur est un vecteur à trois composantes par position spatiale.

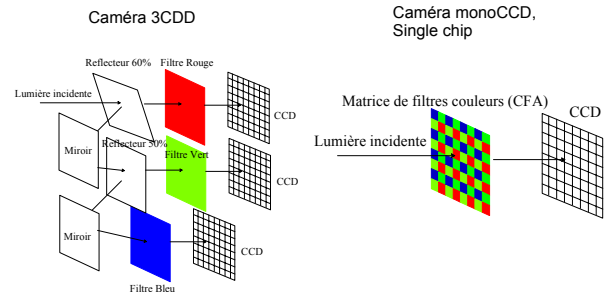


Caméra matricielle couleur 3-CCD



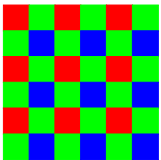
Introduction

- Acquisition d'images numériques couleur



Introduction

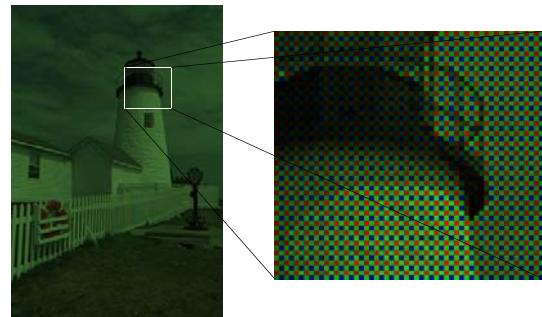
- Le CFA de Bayer, Bayer 1976
 - 2 fois plus de pixels de luminance que de pixels de chrominance
 - Même fréquence d'échantillonnage horizontale et verticale des chrominances.



R ₁₁	G ₁₂	R ₁₃			
G ₂₁	B ₂₂	G ₂₃			
R ₃₁	G ₃₂	R ₃₃			

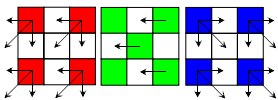
Introduction

- Simulation d'une image CFA par suppression de pixels



Copie de pixels

- Simulation sur le CFA de Bayer



T=0.02



Interpolation bilinéaire

- Simulation sur le CFA de Bayer

$$G_{2,2} = \frac{G_{1,2} + G_{2,1} + G_{3,2} + G_{2,3}}{4}$$

$$R_{2,2} = \frac{R_{1,1} + R_{1,3} + R_{3,1} + R_{3,3}}{4}$$

R ₁₁	G ₁₂	R ₁₃			
G ₂₁	B ₂₂	G ₂₃			
R ₃₁	G ₃₂	R ₃₃			

$$F_G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} / 4 \quad F_{R,B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} / 4$$

Interpolation bilinéaire

