

# Perception et représentation des couleurs

Yann Gousseau

Télécom Paris - IP Paris  
IMA201

## Première partie I

### Couleur et perception

## Les trois éléments de la perception des couleurs :

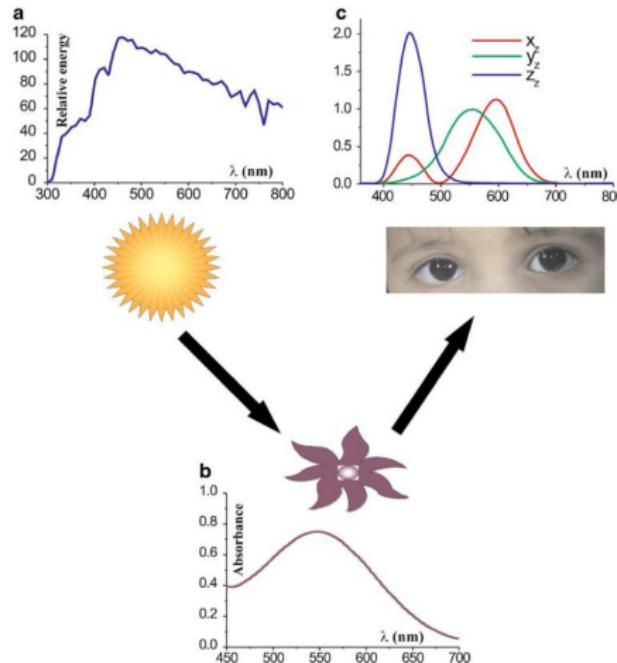


Fig. 1. The color triangle: interaction of illuminant source (a), object's reflectance characteristic (b), and human vision system (c); a Relative energy distribution of D65 illuminant; b CIE color matching function for 2° observer

La couleur résulte de la présence :

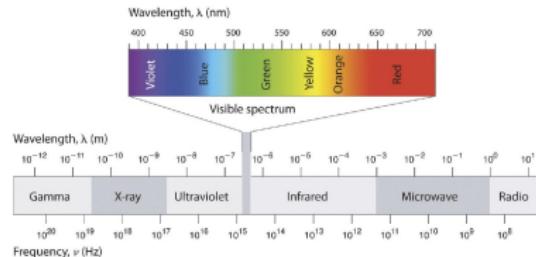
- ① d'un **illuminant** : source de lumière qui éclaire la scène ; caractérisé par sa **distribution spectrale**  $I(\lambda)$
- ② d'un **objet**, qui absorbe, diffuse, réfléchit ou réfracte une partie de la lumière ; caractérisé par son **spectre de réflectance**  $R(\lambda)$  ;
- ③ d'un **observateur** (oeil, capteur photosensible), qui reçoit le spectre de lumière transmis par l'objet  $S(\lambda) = I(\lambda)R(\lambda)$ .  
Cet observateur est caractérisé par les **sensibilités spectrales** de ses photorécepteurs.

Un même objet (un spectre de reflectance) peut conduire à différentes couleurs perçues, en fonction de l'environnement et de l'observateur.

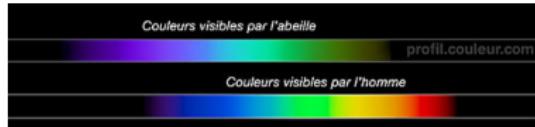
# Illuminant

L'illuminant est une onde électromagnétique

Pour l'humain, la partie visible du spectre correspond à 380nm - 700nm

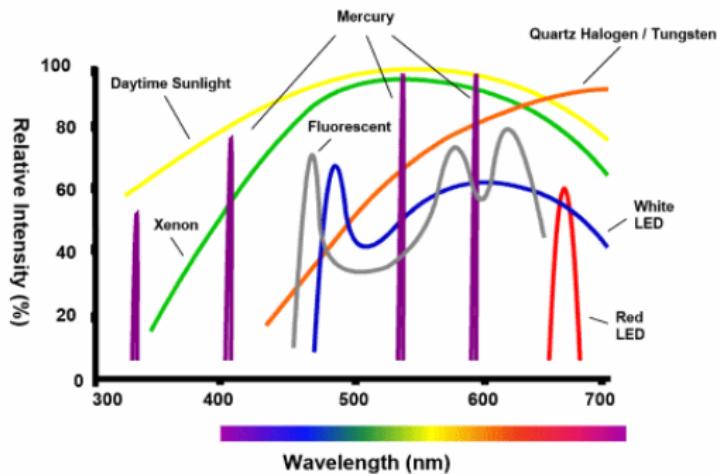


Il existe d'autres types de perception visuelle chez d'autres animaux : infra-rouge (certains reptiles), ultra-violet (certains oiseaux, insectes), etc.



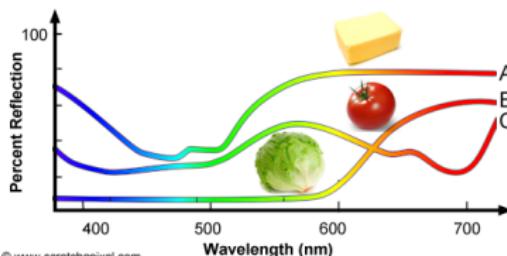
[www.claudegabriel.be](http://www.claudegabriel.be)

Un illuminant est caractérisé par son contenu spectral  $L(\lambda)$



[www.ni.com](http://www.ni.com)

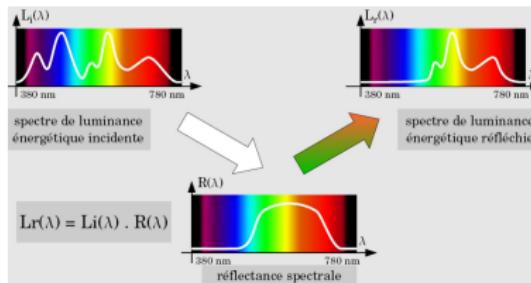
Caractérisé (en chaque point) par son **spectre de reflectance**  $R(\lambda)$



© www.scratchapixel.com

[www.scratchapixel.com](http://www.scratchapixel.com)

Eclairé par un illuminant  $L(\lambda)$ , l'objet renvoie un contenu spectral  $R(\lambda) \cdot L(\lambda)$

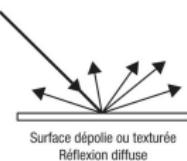
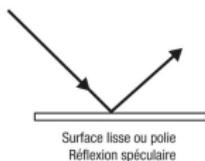


[www.claudegabriel.be](http://www.claudegabriel.be)

## Remarque :

La reflectance d'un objet dépend de l'angle  $\theta$  sous lequel on le regarde :  $R(\lambda, \theta)$ .  
Cette reflectance est une combinaison linéaire de :

- Une composante **lambertienne**  $R_L(\lambda)$
- Une composante **spéculaire**  $R_S(\lambda, \theta)$  (les "reflets")



<https://monde.ccdmd.qc.ca> et pixabay

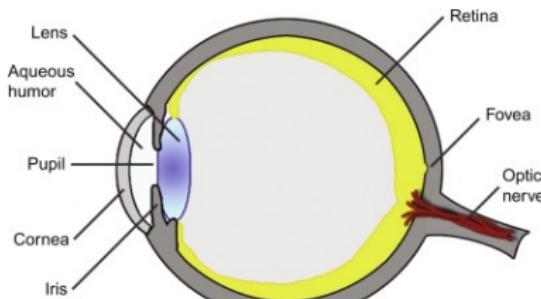


figure Rizzi - Bonanomi 2017

**Fovea** : zone de la rétine où la vision est la plus précise. Haute densité de photorécepteurs.

**Zone aveugle** au niveau du nerf optique.

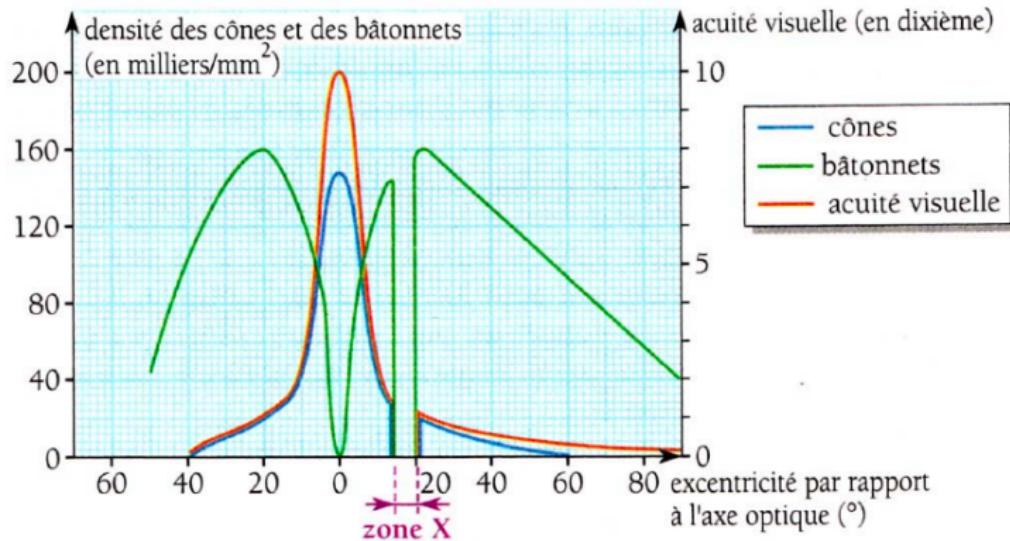
## Zone aveugle au niveau du nerf optique



Fixer le point noir à gauche, puis fermer l'oeil gauche. Ajuster la distance à l'image.

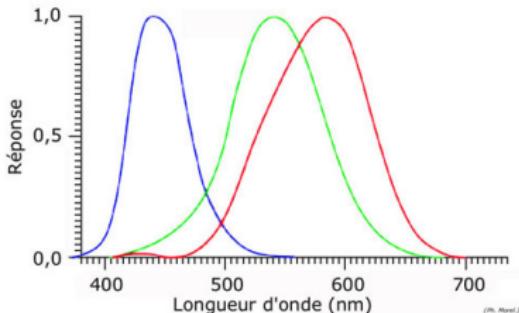
## Photorécepteurs sur la rétine :

- les **bâtonnets**, très sensibles mais peu précis, liés à la vision nocturne ;
- les **cônes**, plus précis mais beaucoup moins sensibles que les bâtonnets, associés à la perception de la couleur.



**Vision trichromatique** : les cônes sont de trois types, selon leur sensibilité spectrale :

- ① Pour les cônes de type S (pour "short"), maximum dans les teintes **bleues** (440 nm).
- ② Pour les cônes de type M (pour "medium"), dans les teintes **vertes** (545 nm).
- ③ Pour les cônes de type L (pour "long"), dans les teintes **rouges-jaunes** (580 nm).



- **Sensibilités** des cônes M et L supérieure à celle des cônes S : l'oeil répond plus fortement à certaines longueurs d'onde qu'à d'autres, à intensité lumineuse égale. **Sensibilité spectrale de l'œil** normalisée  $V(\lambda)$  maximale en  $\lambda \simeq 555\text{nm}$  en vision diurne et 500nm en vision nocturne.
- **Autres espèces** : 3 capteurs (primates Afrique -Asie), 2 capteurs (autres mammifères), ..., 12 capteurs !(crevette mante)



L'espace des stimuli (des spectres lumineux) est infini, mais l'espace des couleurs perçues est tridimensionnel.

On note  $s$ ,  $m$  et  $l$  les sensibilités spectrales respectives des cônes S, M et L

Un spectre  $S(\lambda) = I(\lambda)R(\lambda)$  est perçu comme **trois valeurs** :

$$\langle S, s \rangle := \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} s(\lambda)S(\lambda)d\lambda,$$

$$\langle S, m \rangle := \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} m(\lambda)S(\lambda)d\lambda,$$

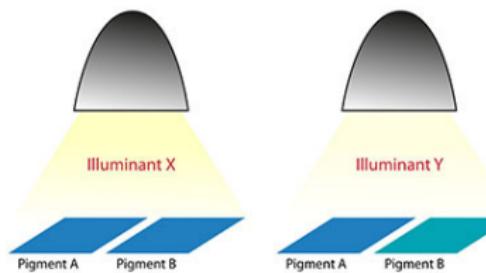
$$\langle S, l \rangle := \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} l(\lambda)S(\lambda)d\lambda.$$

Remarque : un stimulus du spectre visuel, même monochromatique (constitué d'une seule longueur d'onde) produira toujours au moins deux réponses non nulles des cônes. On ne peut donc pas stimuler les cônes séparément (et donc atteindre les triplets élémentaires  $(1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$ ,  $(0, 0, 1)$ ).

**Deux objets de spectres  $R_1$  et  $R_2$  différents apparaissent comme identiques sous un illuminant de distribution  $I(\lambda)$  donnée s'ils présentent les mêmes réponses spectrales, c-a-d si :**

$$\langle I.R_1, s \rangle = \langle I.R_2, s \rangle, \quad \langle I.R_1, m \rangle = \langle I.R_2, m \rangle, \quad \langle I.R_1, I \rangle = \langle I.R_2, I \rangle.$$

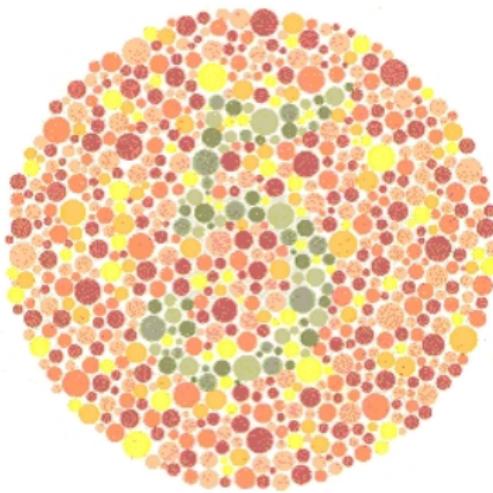
Deux objets peuvent provoquer la même sensation colorée sous un illuminant donné et pas sous un autre !



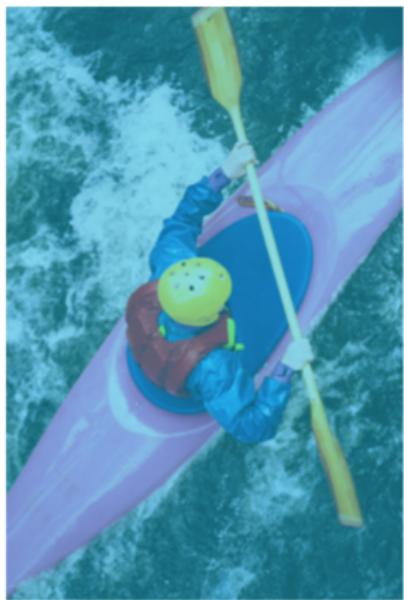
normaprint.fr

**Capteurs numériques** : deux capteurs différents peuvent avoir des sensibilités spectrales différentes...

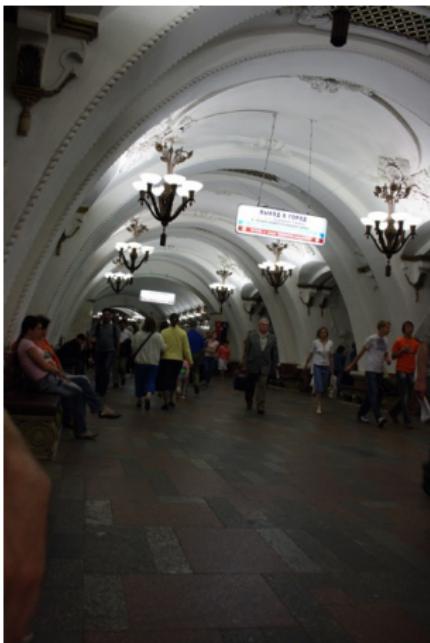
Il existe différents types d'anomalies visuelles liées à la vision des couleurs. Selon les pigments atteints, on parlera d'achromatisme, de dichromatisme, ou de trichromatisme anormal.



# Adaptation chromatique



# Changement d'illuminant et balance des blancs



A gauche, réglage automatique de la balance des blancs sur l'appareil photo, à droite après correction de la balance des blancs.

But :

**estimer l'illuminant de la scène, puis simuler le rendu de la scène sous un illuminant de référence** (soleil en plein jour, D65)



En pratique, on utilise une **transformation linéaire diagonale** (hypothèse de Von Kries) :

But :

**estimer l'illuminant de la scène, puis simuler le rendu de la scène sous un illuminant de référence** (soleil en plein jour, D65)



En pratique, on utilise une **transformation linéaire diagonale** (hypothèse de Von Kries) :

- Estimation de l'illuminant ( $R_0, G_0, B_0$ )
- Transformation linéaire en chaque pixel :

$$T : (R, G, B) \rightarrow \left( \frac{R_1}{R_0} R, \frac{G_1}{G_0} G, \frac{B_1}{B_0} B \right)$$

où  $(R_1, G_1, B_1)$  représente l'illuminant de référence

Il existe de nombreuses méthodes pour identifier l'illuminant initial ( $R_0, G_0, B_0$ )

Il existe de nombreuses méthodes pour identifier l'illuminant initial ( $R_0, G_0, B_0$ )

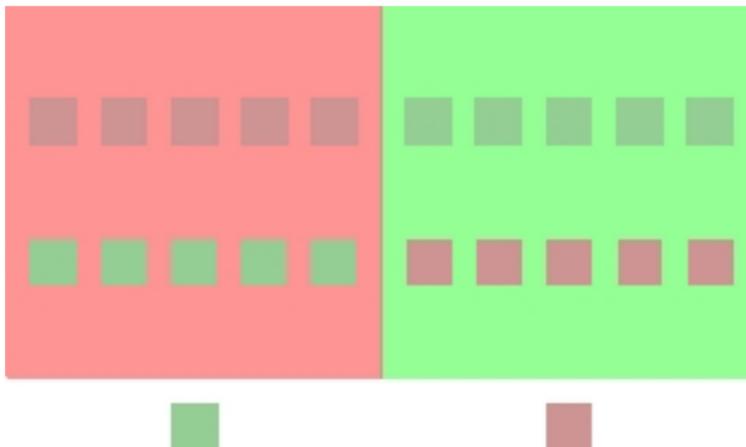
- Modèle *monde gris* : l'illuminant initial est estimé par moyennage global des canaux
- Modèle *patch blanc* : l'illuminant initial est estimé à partir des pixels les plus clairs
- Etc.
- Les méthodes les plus performantes reposent sur l'apprentissage automatique

Pas de bonne définition de la lumière blanche : selon la représentation qu'on en donne (en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence), un spectre uniforme ne correspond pas au même stimulus...

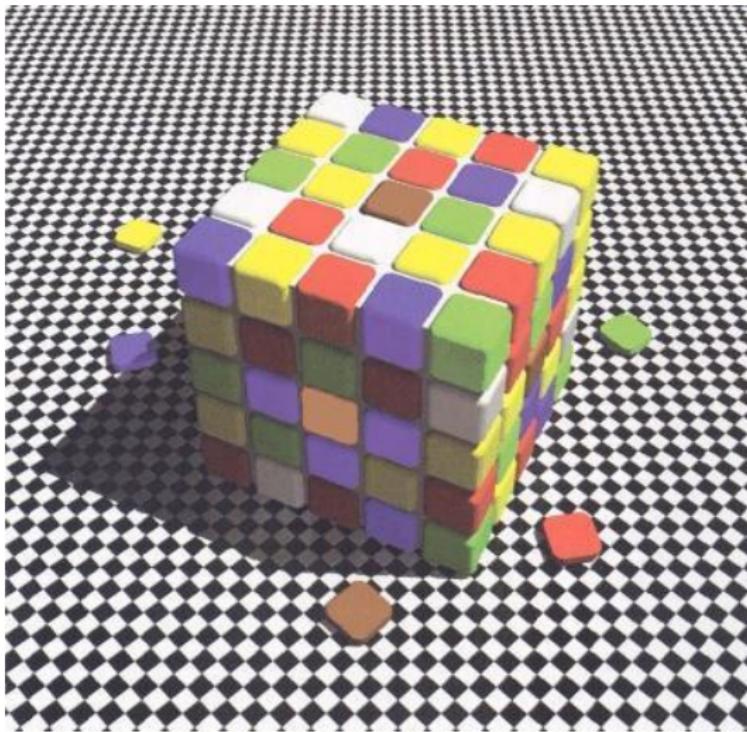
On a vu que notre perception du blanc était très relative, notre cerveau applique une balance des blancs "automatique" pour s'adapter à l'environnement lumineux.

**Différentes définitions de la lumière blanche standardisée :** D65 (CIE Standard Illuminant), censé correspondre à la lumière naturelle (du ciel) en plein jour en Europe (en moyenne sur les différents jours de l'année) ; D50, lumière du soleil mesurées dans certaines conditions, etc.

Sensibilité au contraste local.

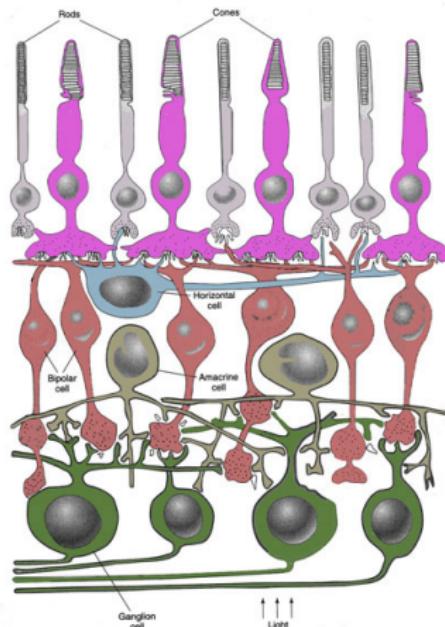


Sensibilité au contraste local.



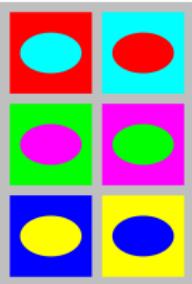
# Traitement au niveau de la rétine

- Des neurones de la rétine assurent certaines opérations simples sur les signaux envoyés par les capteurs photosensibles
  - Opérations de type dérivation, différence centre-périmétrie, etc.
  - soustraction rouge-vert et bleu-jaune (couleurs opposées)
- Premier niveau du traitement de l'information visuelle (avant le cerveau)
- utile pour **compresser** les signaux visuels (capacité réduite du nerf optique)



# Couleurs complémentaires / opposées

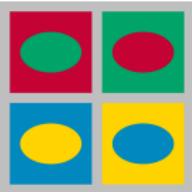
**couleurs complémentaires** : telles que leur mélange produise du gris



Couleurs complémentaires (RGB)

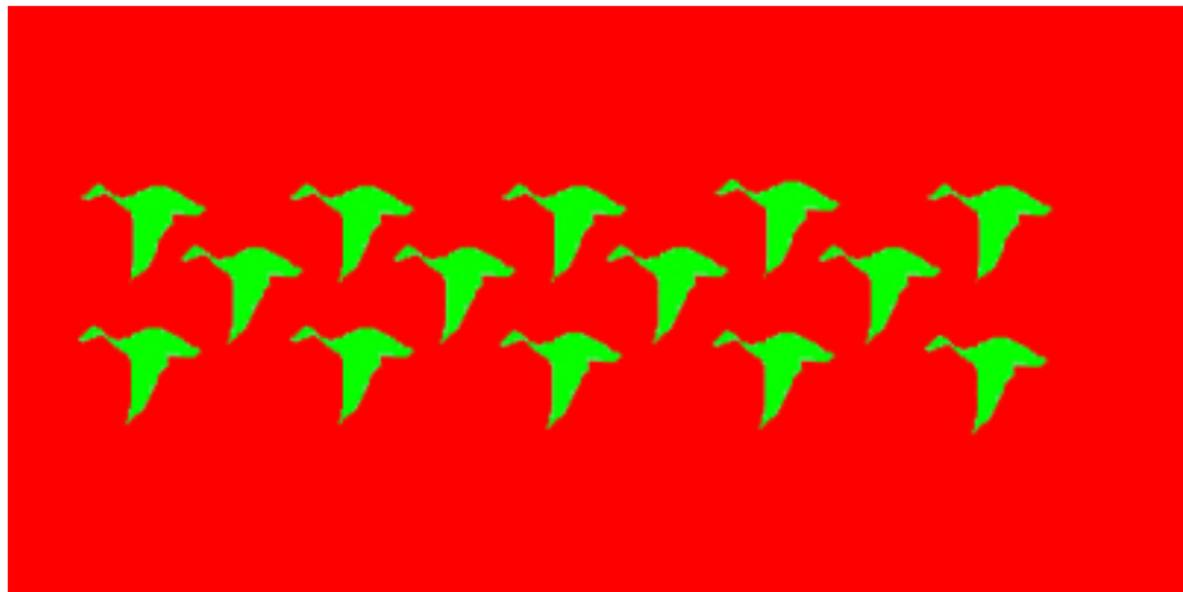
## couleurs opposées

- Un système comprenant 4 couleurs de base (rouge, vert, bleu, jaune) est proposé au 19e s. pour expliquer certains aspects de notre perception des couleurs (jaune perçu comme couleur primaire, jamais de teinte bleu dans un jaune, etc.)
- Les couleurs opposées sont jaune-bleu et rouge-vert
- Justifié physiologiquement par les traitements rétinaux



Couleurs opposées

# Couleurs complémentaires



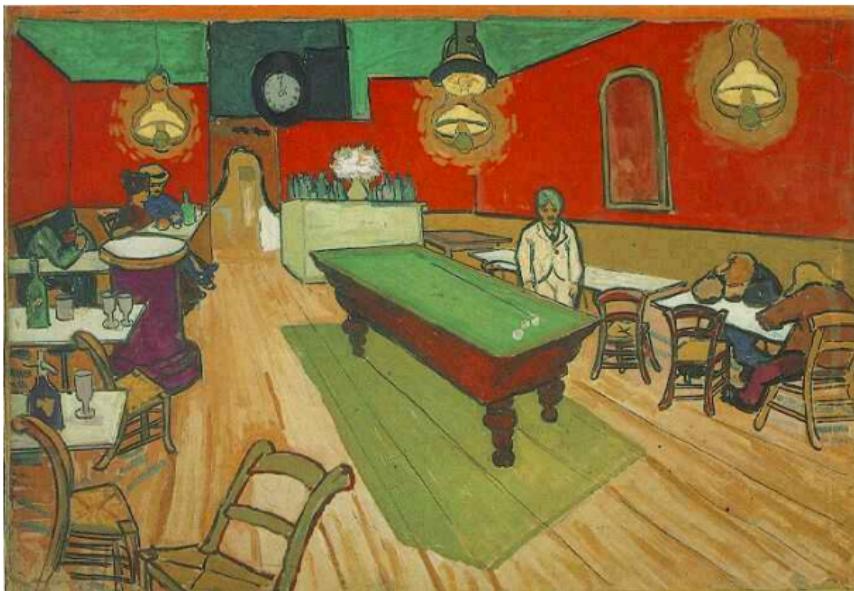
Fixez l'image ci-dessus pendant environ 30 secondes, puis passez à la planche suivante

# Couleurs complémentaires

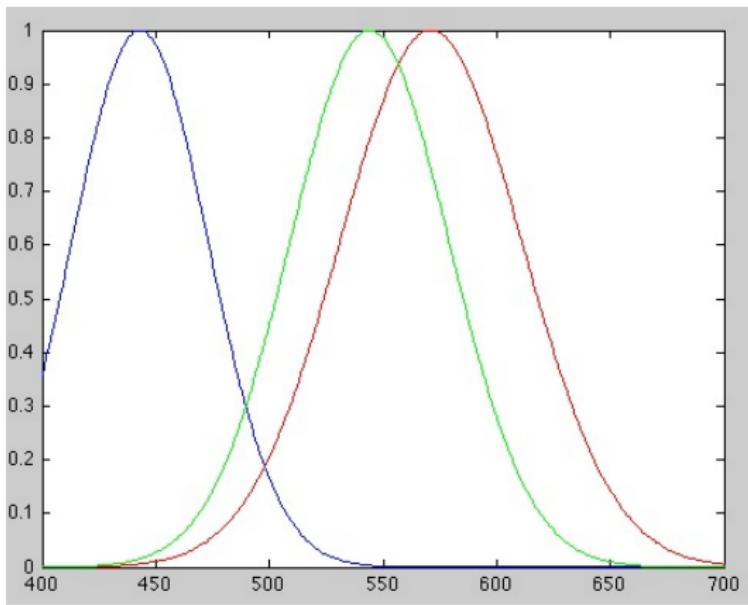
# Une conséquence pratique



# Couleurs opposées en art

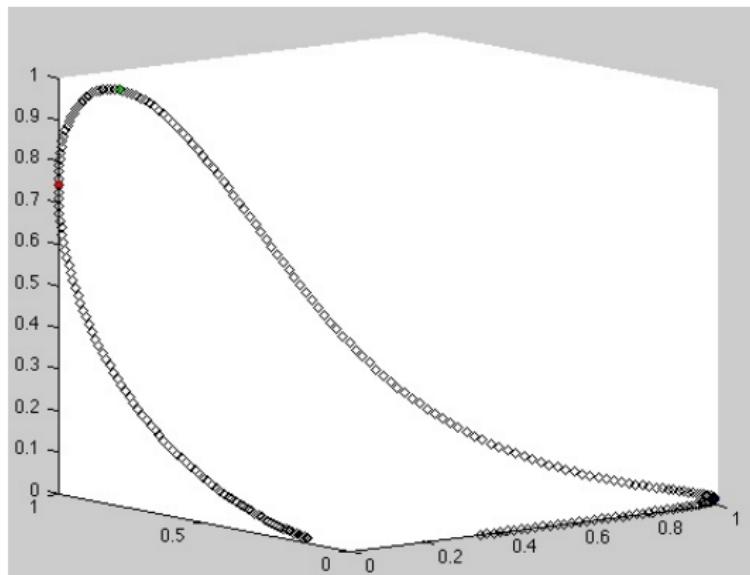


# Espace des couleurs perçues



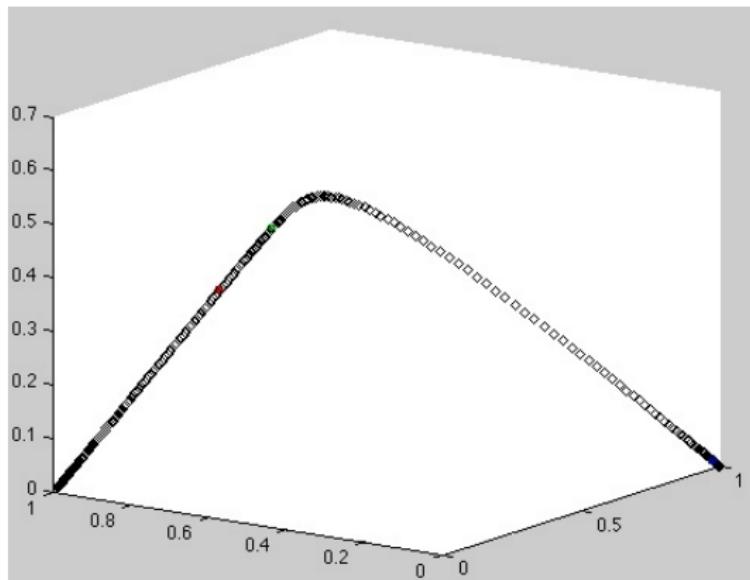
*Simulation matlab* : les réponses des cônes sont simulées comme 3 gaussiennes.

# Espace des couleurs perçues



*Simulation matlab* : courbe de l'ensemble des couleurs monochromatiques (triplets  $\langle S, s \rangle$ ,  $\langle S, m \rangle$ ,  $\langle S, l \rangle$ ) lorsque  $S$  parcourt les signaux monochromatiques). Les couleurs visibles sont représentées par l'intérieur du cône de sommet  $(0 ; 0 ; 0)$  et engendré par cette courbe.

# Espace des couleurs perçues

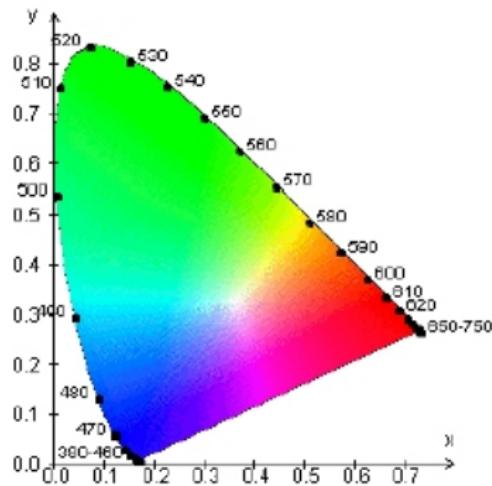


*Simulation matlab* : intersection du cône des couleurs visibles avec le plan  $x + y + z = 1$ .

# Système XYZ CIE 1931 puis 1964

Couleurs du visibles dans l'espace de représentation XYZ, projetées sur le plan  $x + y + z = 1$ . L'espace tridimensionnel des couleurs peut-être considéré comme bidimensionnel (représentation projective) en normalisant par l'intensité lumineuse.

**Définition de la teinte** = segment partant du point blanc et rejoignant une couleur monochromatique, ou une couleur "pourpre" (mélange de violet et de rouge).



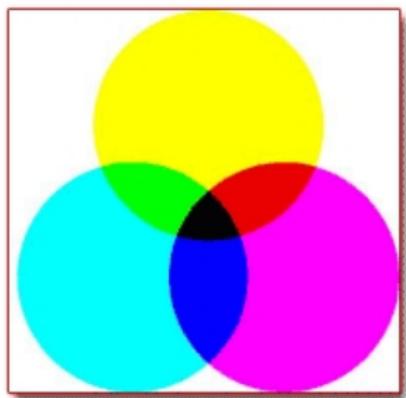
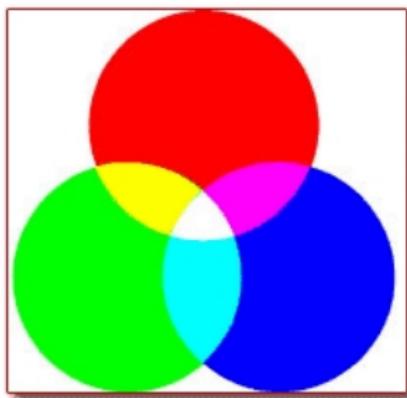
# Teinte et saturation des couleurs



# Teinte et saturation des couleurs

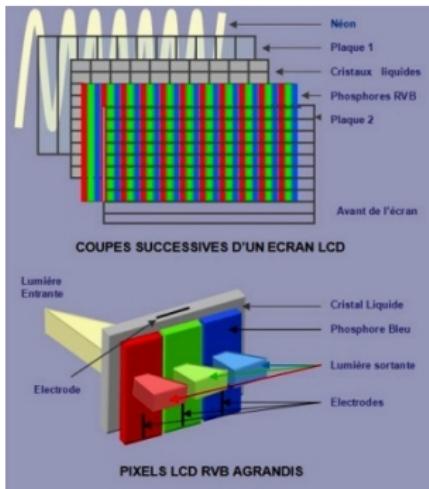


## Synthèse additive / Synthèse soustractive

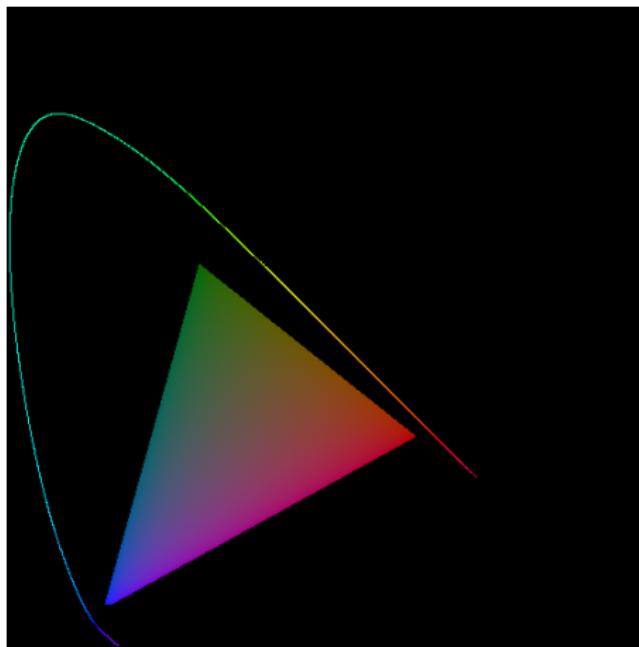


# Restitution des couleurs : synthèse additive

Ecrans CRT, LCD, Plasmas, OLED, laser, etc.



**Principe de la synthèse additive** : reproduire à l'aide de 3 sources primaires la même sensation de couleur qu'un stimulus  $S(\lambda)$  donné.  
Aucun écran ne peut reproduire toutes les couleurs du spectre visible (limite en saturation et en luminosité).



# Restitution des couleurs : synthèse soustractive

Quadrichromie : procédé d'imprimerie consistant à reproduire des couleurs à partir de trois teintes de base (cyan, magenta, jaune) et de noir.



*Source des images : wikipedia.*

# Restitution des couleurs : synthèse soustractive

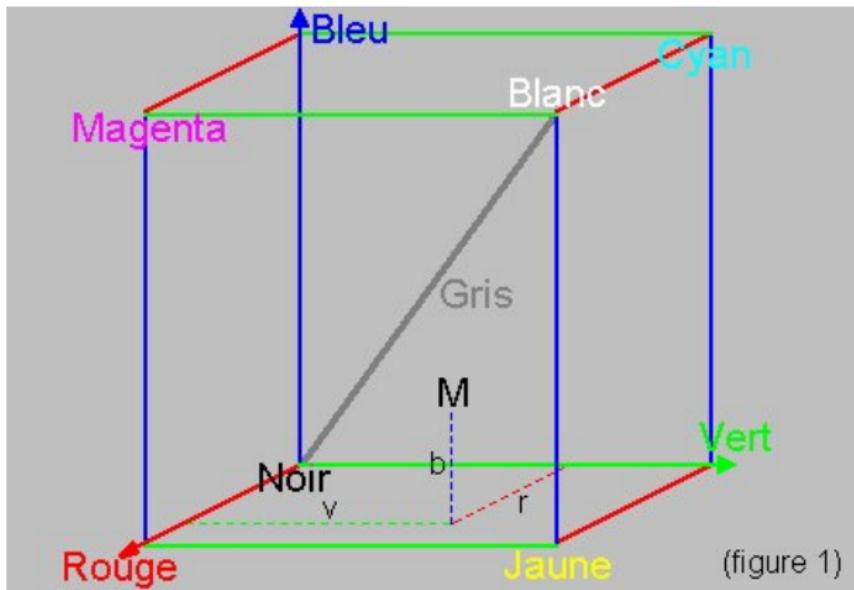
Quadrichromie : procédé d'imprimerie consistant à reproduire des couleurs à partir de trois teintes de base (cyan, magenta, jaune) et de noir.



Source des images : wikipedia.

## Deuxième partie II

### Espaces couleur



# Décomposition RGB

Image couleur.



Composante R.



Observation : les trois composantes R, G, B sont très corrélées.

Composante G.



Observation : les trois composantes R, G, B sont très corrélées.

Composante B.



Observation : les trois composantes R, G, B sont très corrélées.

# Différents espaces RGB

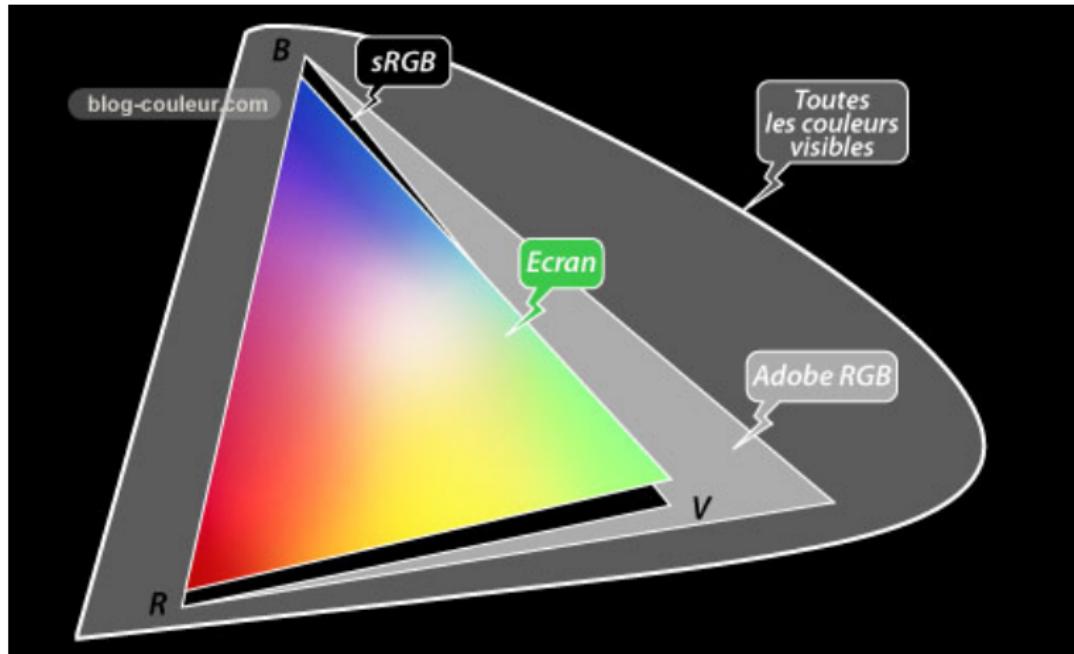


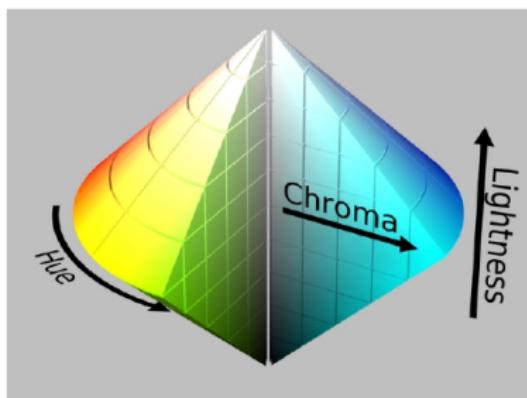
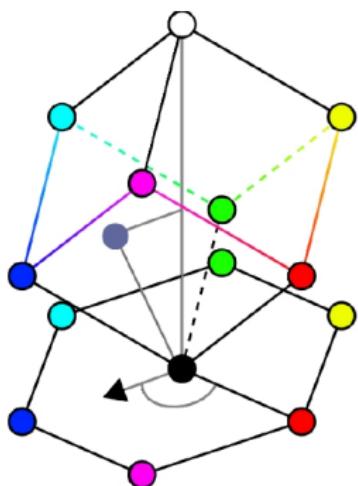
Illustration : [www.blog-couleur.com](http://www.blog-couleur.com)

Espaces de représentation classique en traitement des images, computer graphics etc. Le but de ces espaces est de décrire les couleurs à l'aide de trois attributs du type luminance  $V$ , teinte (ou *hue H*) et saturation  $S$ . Représentations coniques ou cylindriques définies à partir d'une transformation des coordonnées R, G, B.



- **Luminance V** : attribut de la sensation visuelle selon lequel une surface éclairée par une source lumineuse déterminée paraît émettre plus ou moins de lumière. Correspond à l'aspect clair, foncé ou terne d'une couleur.
- **Teinte H** : attribut de la sensation visuelle qui a suscité les dénominations de couleur.
- **Saturation S** : attribut permettant d'estimer la proportion de couleur chromatiquement pure contenue dans la sensation totale. Caractérise le côté plus ou moins "délavé", degré de mélange de la longueur d'onde prédominante avec le blanc.

# Principe général (espace Hue-Chroma-Luminance)



# Conversion RGB-HSV

On définit :

$$H = \begin{cases} \left(60^\circ \times \frac{G-B}{max-min} + 360^\circ\right) mod 360^\circ & \text{si } max = R \\ \left(60^\circ \times \frac{B-R}{max-min} + 120^\circ\right) & \text{si } max = G \\ \left(60^\circ \times \frac{R-G}{max-min} + 240^\circ\right) & \text{si } max = B \\ 0 & \text{si } max = min \end{cases}$$

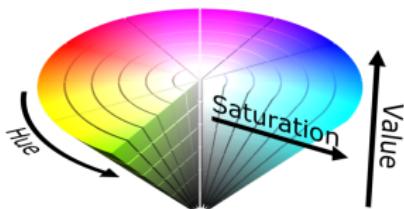
$$S = \begin{cases} 1 - \frac{min}{max} & \text{si } max \neq 0 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$V = max$$

Avec

$$max = max(R, G, B)$$

$$min = min(R, G, B)$$



Ces espaces (HSV, etc.) sont particulièrement utiles pour la restauration ou l'édition d'images. Les espaces RGB peuvent facilement conduire à des fausses couleurs. Les

espaces de type HSV permettent de généraliser les cas couleur, les algorithmes de changement de contraste vus lors du deuxième cours (changements de contraste, égalisation d'histogramme, prescription d'histogrammes, etc.)

# Décomposition HSV

Image couleur.



## Composante V.



## Composante S.



Composante H.



# Décomposition HSV

Même image avec forte compression JPEG.



## Composante V.



Composante S.

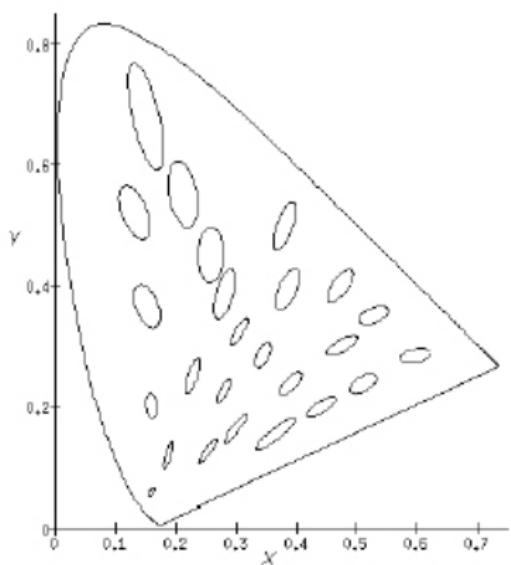


Composante H.



# Non uniformité de la perception aux écarts de couleur dans l'espace XYZ

Expériences dans les années 40 : ellipses de Macadam.



Nombreux travaux de recherche pour établir un espace de couleur **perceptuellement uniforme**, dans lequel les distances entre couleurs proches correspondraient bien à la perception de l'écart entre ces couleurs.

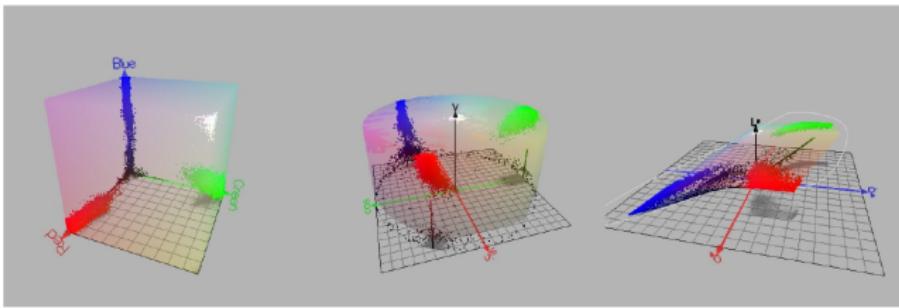
- La coordonnée  $L$  représente **la luminance**, elle correspond à l'axe des niveaux de gris.
- Les coordonnées  $a, b$  **représentent la chrominance**, i.e. les plans définis par les axes  $a, b$  sont à luminance constante, ils sont construits sur deux oppositions de couleurs : le rouge et le vert, le bleu et le jaune.
- Ces deux espaces peuvent être décrits indifféremment, soit sous leur forme cartésienne soit sous leur forme cylindrique.

**Mesure de différence de couleur :**

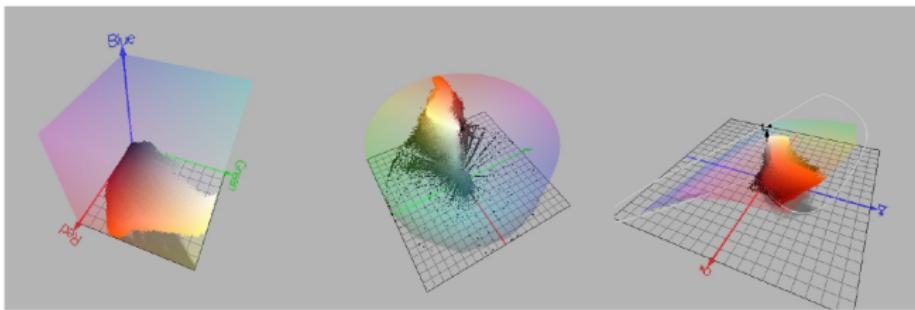
$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}.$$

# Exemples

G	R	G	B	G	R	G	B
B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	C	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G
G	R	G	R	G	R	G	R
B	G	B	G	B	G	B	G



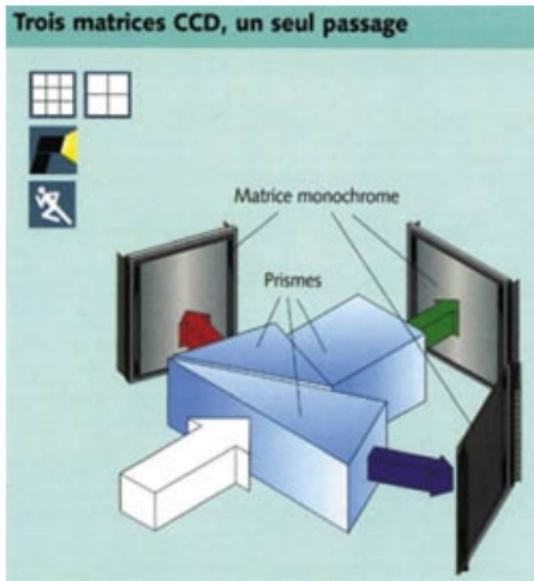
# Exemples



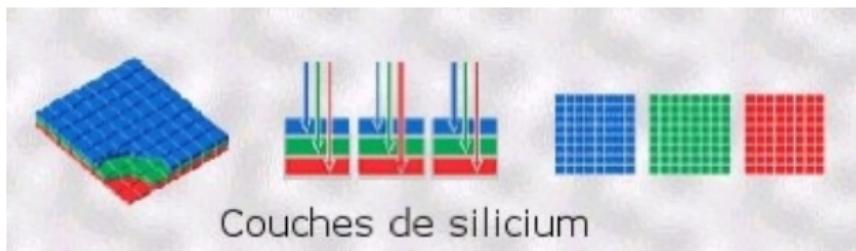
## Troisième partie III

Capteurs couleur et Détramage

## Capteur Tri-CCD

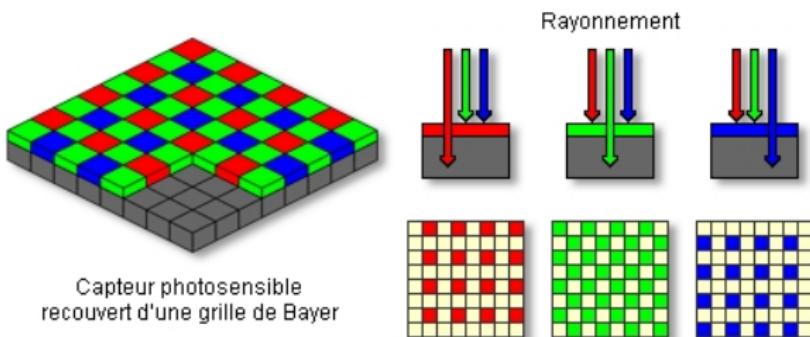


## Capteur X3 (Foveon) (appareils Sigma)



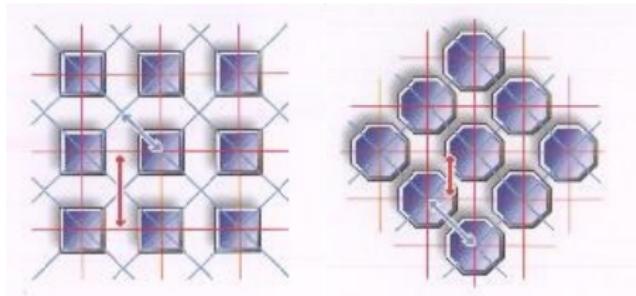
Source : [laphotonumerique.free.fr](http://laphotonumerique.free.fr)

Capteur CCD : **trame de Bayer** ou Bayer color filter array (CFA), 1976.  
Le plus courant dans les APN

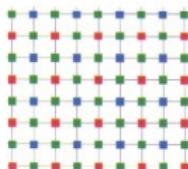


Source : wikipedia.fr

## Capteur Super-CCD (Fujii)

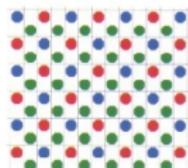


Conventional CCD



Chaque ligne a des photosites soit verts, bleus soit verts, rouges

Super CCD



Chaque ligne a des photosites Rouges, verts et bleus

Source : Fujifilm

Exemple d'image obtenue par la trame de Bayer (par ex. fichier RAW d'un reflex numérique).



Fichier RAW (12 bits) compressé sans perte



Fichier TIFF ou JPEG 24 bits.

interpolation

L'image finale est obtenue par interpolation



Fichier RAW (12 bits) compressé sans perte



interpolation

Fichier TIFF ou JPEG 24 bits.

# Interpolation bilinéaire

A gauche, image “LightHouse” originale. A droite, image obtenue par interpolation bilinéaire de chaque couleur de la trame de Bayer.



→ satisfaisant dans les régions homogènes mais lissage des bords et textures et apparition de fausses couleurs, en particulier près des bords ou des zones hautes fréquences présentant des motifs complexes (interpolation naïve d'images aliasées).

Notation :  $\Omega_r$  est l'ensemble des pixels “rouges” (resp. verts ou bleus pour  $\Omega_g$  ou  $\Omega_b$ ) de la trame de Bayer.

- ① Estimation des **dérivées** (premières, secondes) en chaque point de l'image à l'aide de schémas discrets ;
- ② **Interpolation anisotropique de la composante verte** aux points de  $\Omega_r \cup \Omega_b$ .  
**Les directions dans lesquelles la dérivée est la moins importante sont privilégiées** (seuil ou fonction décroissante de la dérivée).
- ③ **Interpolation de  $b/g$  et  $r/g$ .**
- ④ Eventuellement itération des corrections précédentes.

# Algorithme de Kimmel (1999)

A gauche, résultat obtenu en utilisant un algorithme suivant les grandes lignes du transparent précédent.

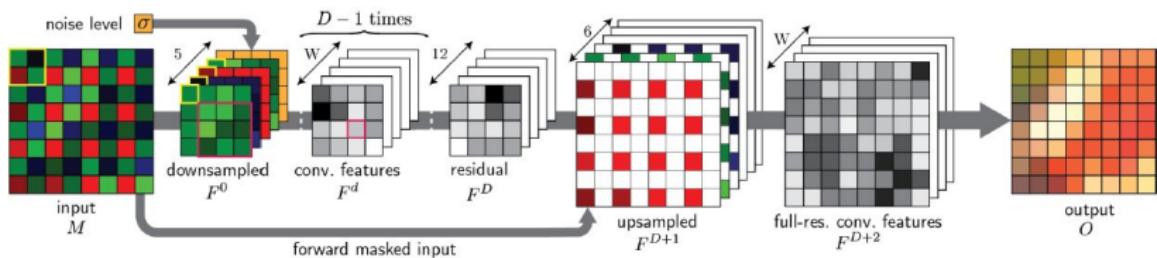
A droite, interpolation bilinéaire de chaque composante.



R. KIMMEL, Demosaicing : Image Reconstruction from Color Samples, IEEE Trans. Image Processing, Vol. 8, no. 9, 1999, pp. 1221-1228.

# Détramage par réseaux de neurones

Alternative : recours aux réseaux de neurones pour générer les échantillons manquants.



Architecture de *Deep Joint Demosaicking and Denoising*, Gharbi et al., 2016