

Title background : Rotating snakes illusion, by Akiyoshi KITAOKA

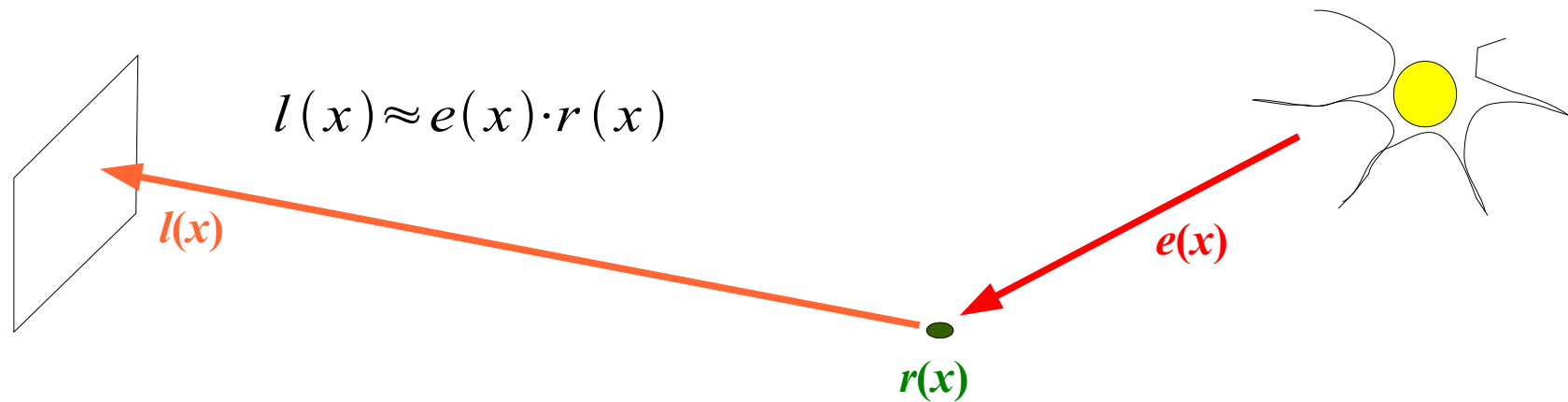
Antoine Manzanera – ENSTA-ParisTech / U2IS

Introduction à la Couleur

Couleur : perception, formalismes, traitements

- *Introduction : ombres et réflectance*
- *Aspects physiques et perceptuels*
- *Acquisition et Restitution*
- *Les espaces couleur : RGB, XYZ, HSV, Yuv*
- *Traitements d'images couleur*

Niveau de gris et réflectance



- Grandeur mesurée par le capteur : *intensité du flux lumineux réfléchi* $l(x) = r(x) \cdot e(x)$.
- Grandeur significative de l'objet : *réflectance* $r(x)$.

Retrouver $r(x)$ à partir de $l(x)$ est un *problème inverse* qu'on résout habituellement par transformation de $l(x)$ sous l'hypothèse que l'éclairement représente une perturbation (un bruit !) *multiplicative* et *basse fréquence*.

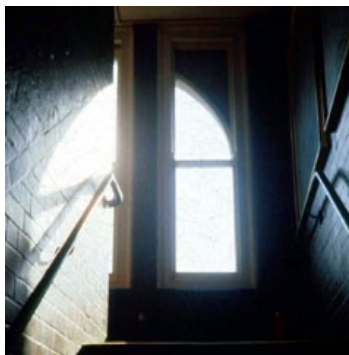


Image visible avec forte variation de l'illumination e : on cherchera à retrouver la composante de réflectance r à partir du niveau de gris l :

$$l(x) = r(x)e(x)$$



Filtrage homomorphique

Pour un bruit additif, on avait $g(x) = f(x) + b(x)$, et donc dans le domaine de Fourier $G(u) = F(u) + B(u)$.

On pouvait donc tenter d'éliminer $B(u)$ directement sur le spectre (ex : filtre passe-bas : multiplication par le complémentaire de la fonction indicatrice du support de B), ou ce qui est équivalent, par convolution.

Dans le cas d'un bruit multiplicatif $g(x) = f(x).b(x)$, on n'a plus addition des spectres, on ne peut donc plus fonctionner par convolution directe.

Le principe du filtrage homomorphique est de se ramener au cas linéaire en passant par le logarithme :

$$g \xrightarrow{\text{logarithme}} h = \log(g) \xrightarrow{TF} H \xrightarrow{\text{Filtrage}} H \times T \xrightarrow{TF \text{ inverse}} k \xrightarrow{\text{exponentiel}} \hat{f} = e^k$$

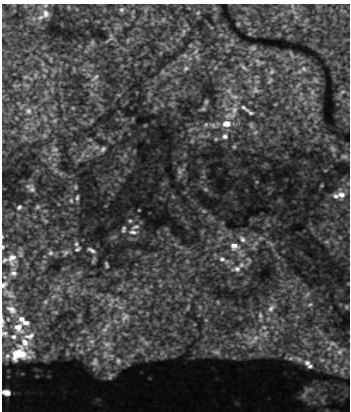


Image radar (SAR) : bruit multiplicatif (speckle)
Haute Fréquence

Image visible : bruit multiplicatif (éclairage)
Basse Fréquence



Filtrage homomorphique



Application du filtrage homomorphique gaussien (réduction de la bande 0,5--1,1) – Agarwal-Gupta.

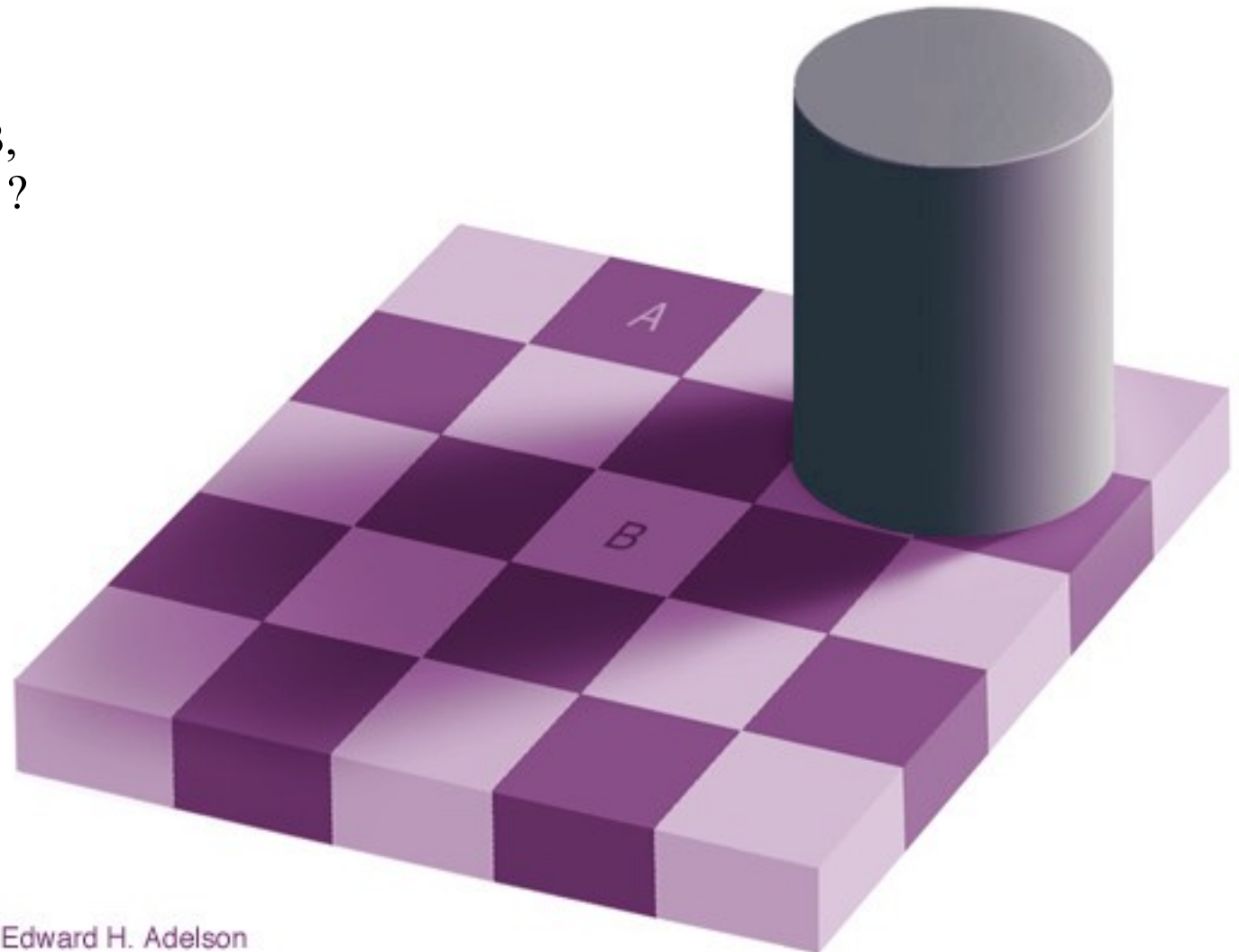
Ombre propre / ombre portée



Ombre et constance des couleurs

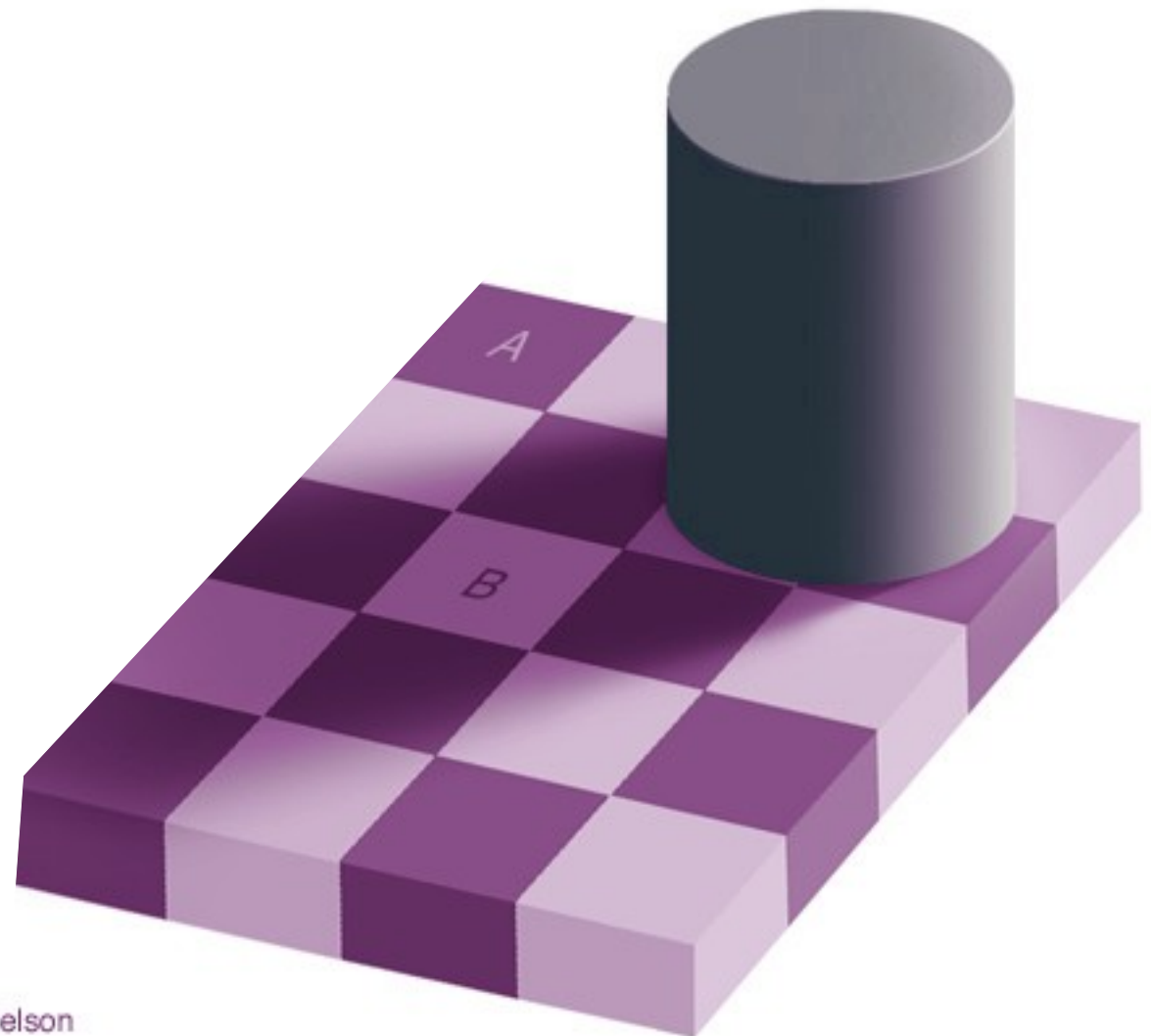
Illusion de l'échiquier d'Adelson :

Entre la case A et la case B,
laquelle est la plus sombre ?



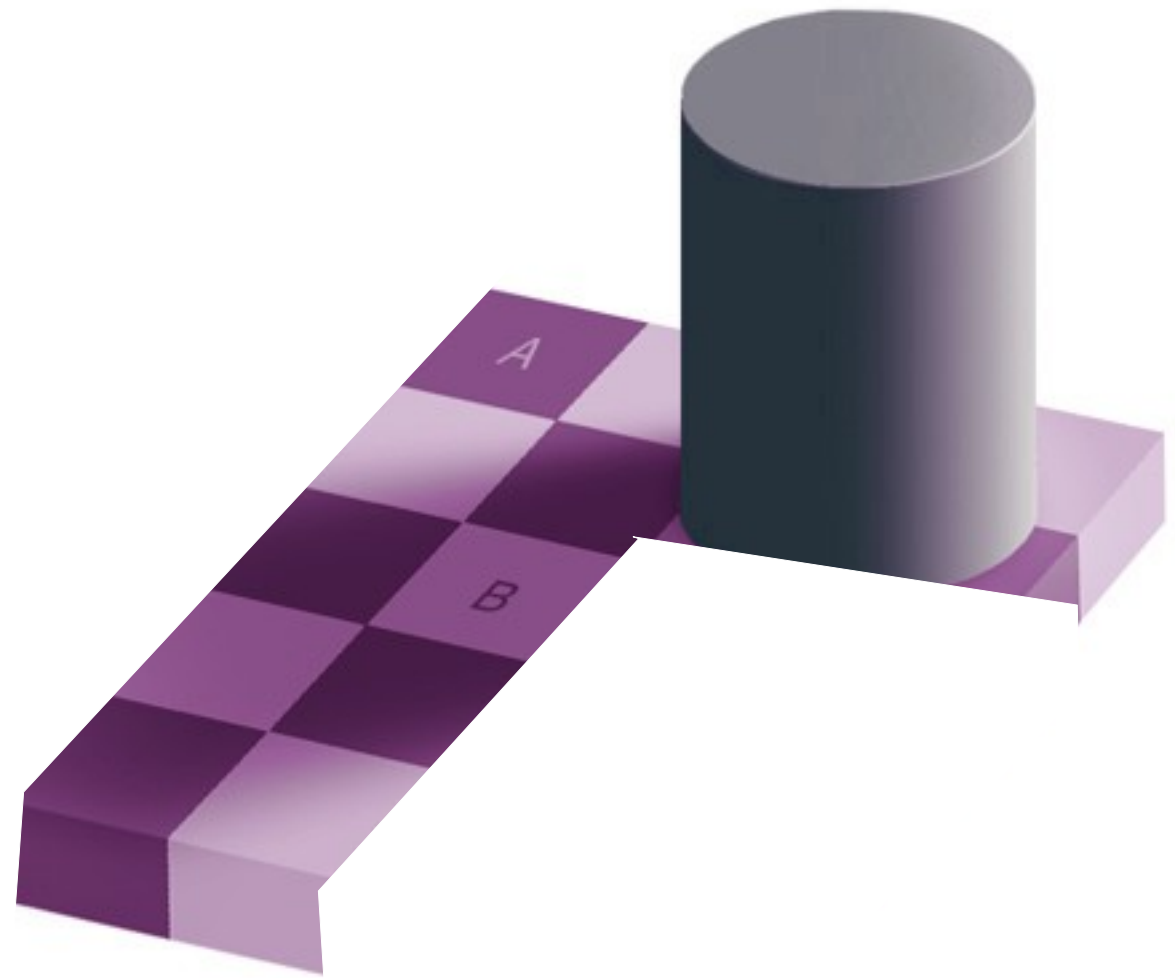
Edward H. Adelson

Ombre et constance des couleurs



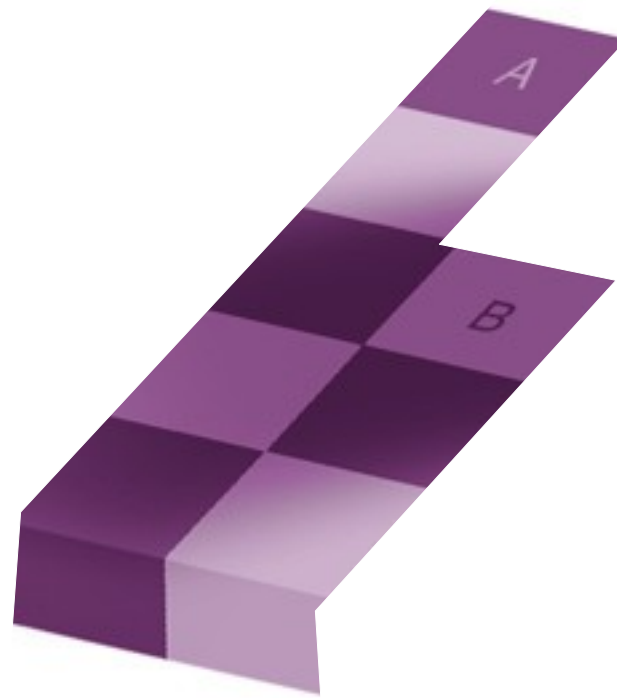
Edward H. Adelson

Ombre et constance des couleurs



Edward H. Adelson

Ombre et constance des couleurs



Edward H. Adelson

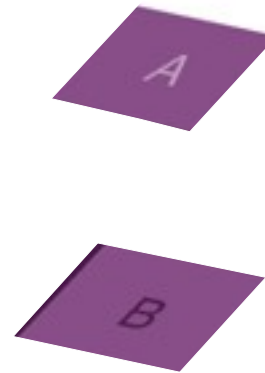
Ombre et constance des couleurs

Illusion de l'échiquier d'Adelson :

Les cases A et B ont la même couleur.

3 niveaux de perception coopèrent pour renforcer cette illusion :

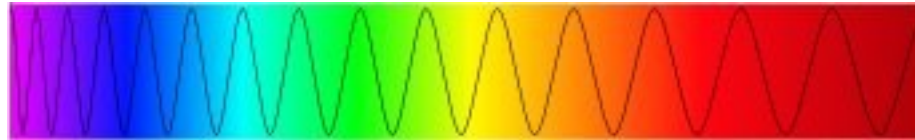
1. Bas niveau (Rétine) :
Rehaussement du contraste local.
2. Haut niveau (Cortex) :
Interprétation de l'ombre et correction.
3. Très haut niveau :
Reconnaissance d'un échiquier.



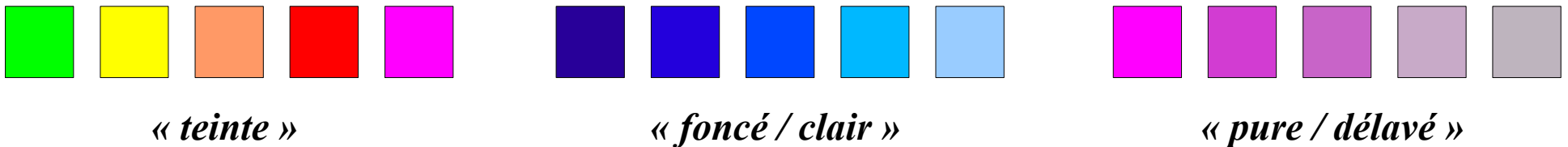
Edward H. Adelson

La couleur : Introduction

Les couleurs trouvent leur origine dans la *séparation de la lumière blanche* naturelle en composantes *absorbées* et composantes *réfléchies*. Toute source lumineuse visible est composée d'un *mélange d'ondes électromagnétiques cohérentes* (i.e. couleurs pures), dont la longueur d'onde est comprise entre $0,4 \mu\text{m}$ (violet) et $0,7 \mu\text{m}$ (rouge) :



Un mélange quelconque de ces couleurs pures engendre une autre couleur, qu'on peut qualifier en termes de nuances selon différents critères plus ou moins intuitifs :

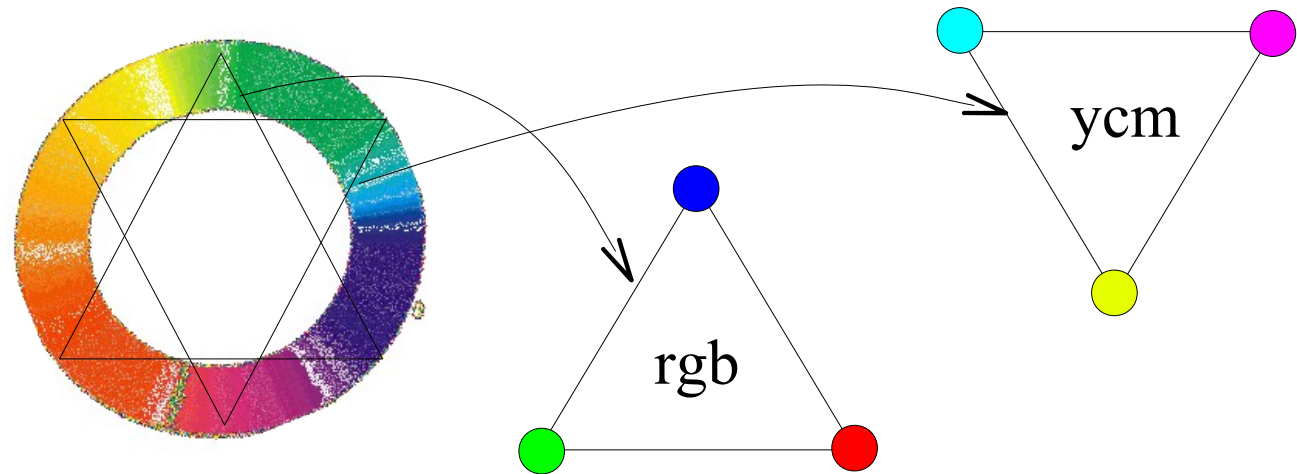


La question principale que nous allons considérer dans la suite est :
« *Comment représenter ces couleurs dans un espace qui soit à la fois facile à manipuler et qui soit pertinent en termes d'analyse d'images couleur ?* »

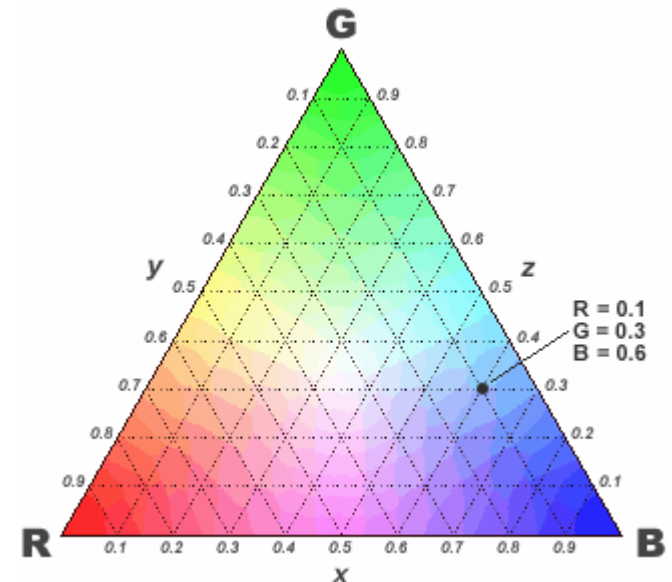
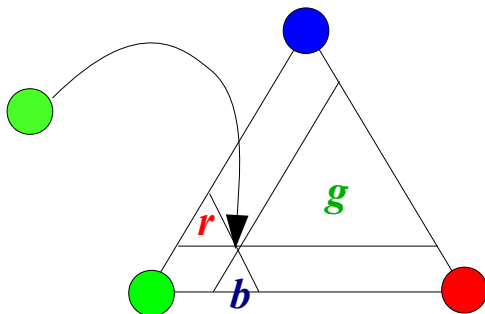
La trichromie

Le principe de la trichromie réside dans la découverte qu'il suffit d'un *triplet de couleurs pures* pour restituer – par mélange de ces 3 composantes qu'on peut qualifier de *primaires* – l'intégralité des couleurs.

Le cercle de Newton peut ainsi se « résumer » en un triangle de primaires.



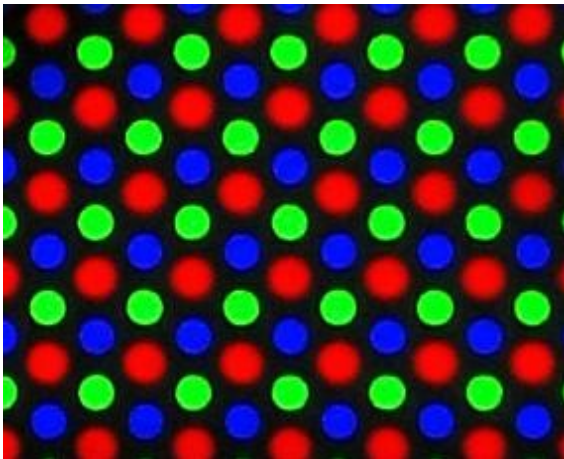
En remplissant le triangle de primaires selon la loi des aires ci-dessous, on obtient le triangle de Maxwell :



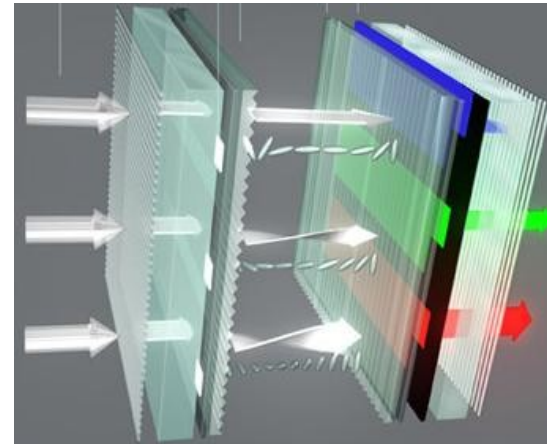
Restitution de la couleur

La trichromie permet donc de voir l'ensemble des couleurs comme un espace vectoriel de dimension 3, où 3 sources lumineuses primaires (r,g,b) varient en intensité entre 0 et 100%.

Ce principe de synthèse additive de la couleur se retrouve dans la plupart des dispositifs lumineux de restitution de la couleur : CRT, LCD, Plasma.



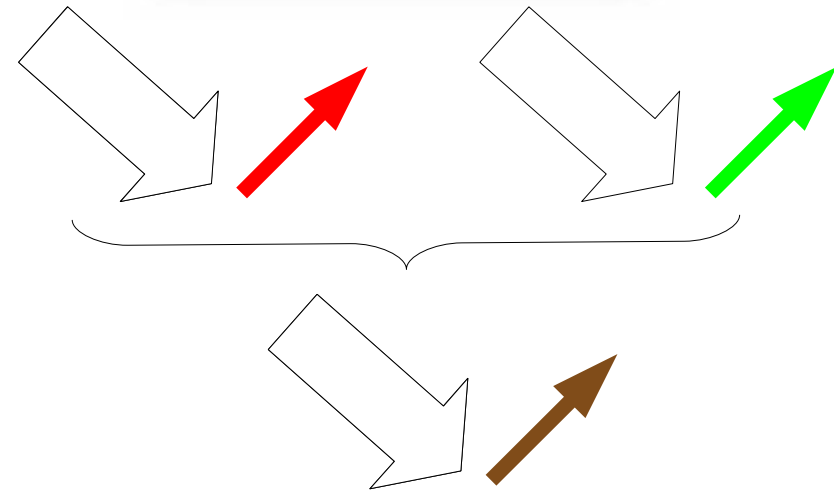
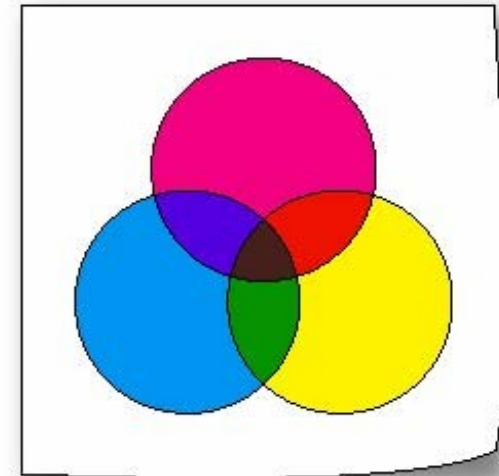
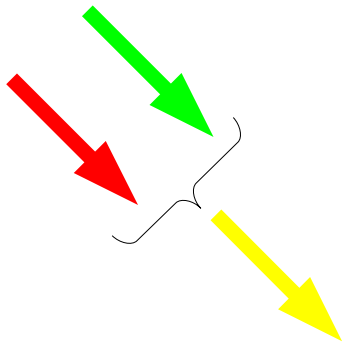
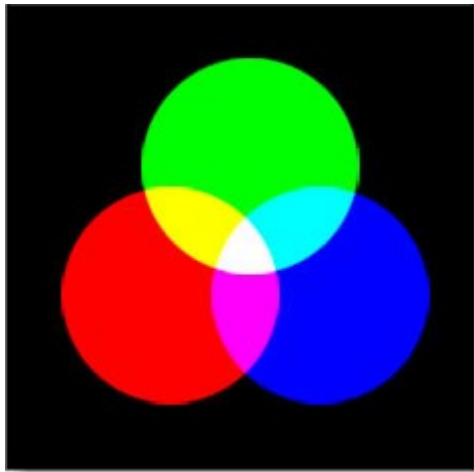
Dans les écrans cathodiques (CRT), 3 canons à électrons balayent une grille de photophores rouges, verts et bleus, avec une intensité variable.



Dans les écrans à cristaux liquides (LCD), 3 matrices de cristaux liquides sont contrôlées par un couple de polariseurs qui change l'orientation des cristaux, en modifiant la transparence de chaque pixel, ces matrices sont rétro-éclairées à travers des filtres rouge, vert et bleu.

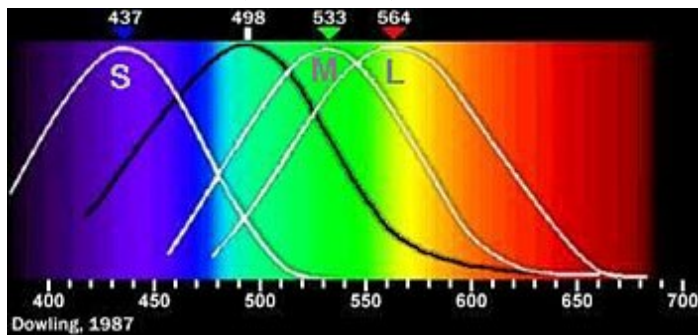
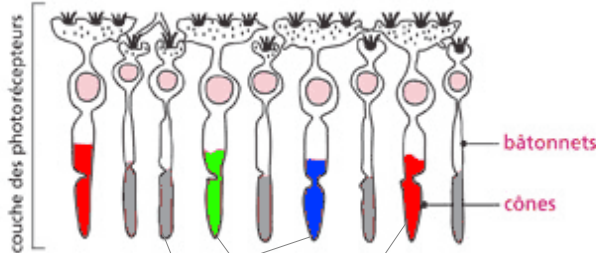
Synthèse additive et synthèse soustractive

Ne pas faire de confusion entre la *synthèse additive* réalisée par des *sources lumineuses chromatiques* et la *synthèse soustractive* opérée par le mélange de *pigments colorés*.



Acquisition de la couleur

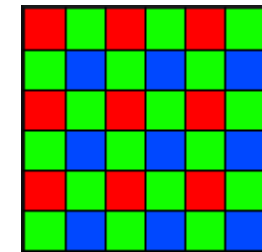
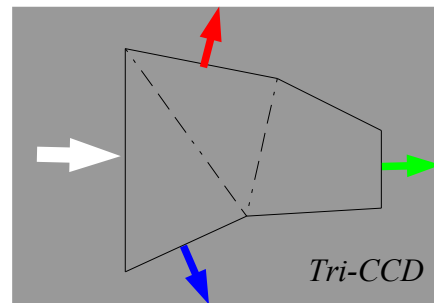
Les systèmes d'acquisition de la couleur fonctionnent aussi habituellement par une combinaison locale de capteurs sélectifs sensibles à une certaine partie du spectre lumineux.



Dans la partie centrale de la rétine humaine (fovea) se trouvent les cellules photoréceptrices appelées cônes, qui se distinguent en trois types selon leur spectre de sensibilité.

Noter que globalement, notre œil ne présente pas la même sensibilité aux différentes longueur d'ondes (max dans le vert/jaune).

Les caméras CCD les plus coûteuses intègrent 3 matrices photosensibles éclairées par des prismes semi-réflecteurs. Les caméras CCD et CMOS grand public intègrent une seule matrice avec des damiers de filtres rouge, vert, bleu.



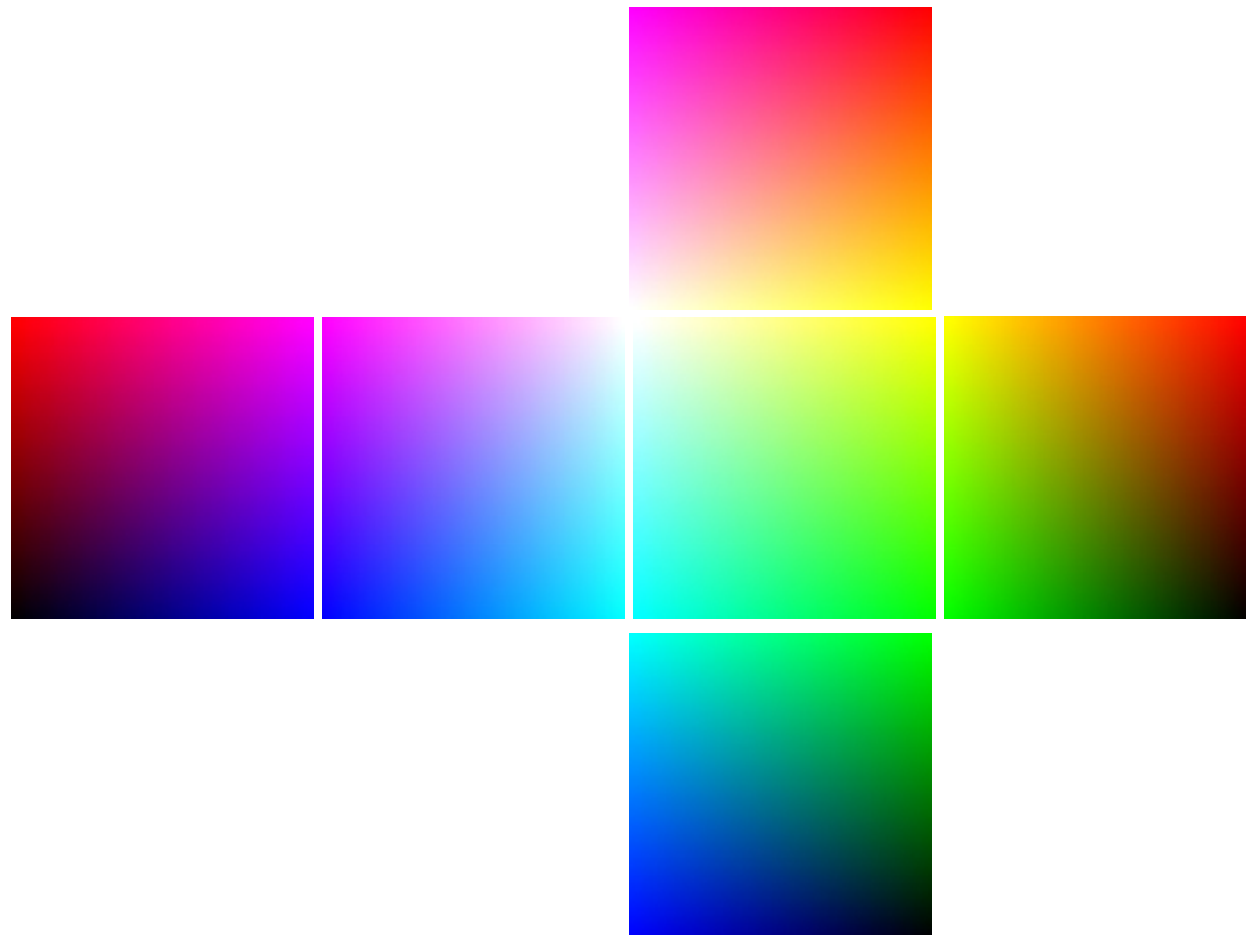
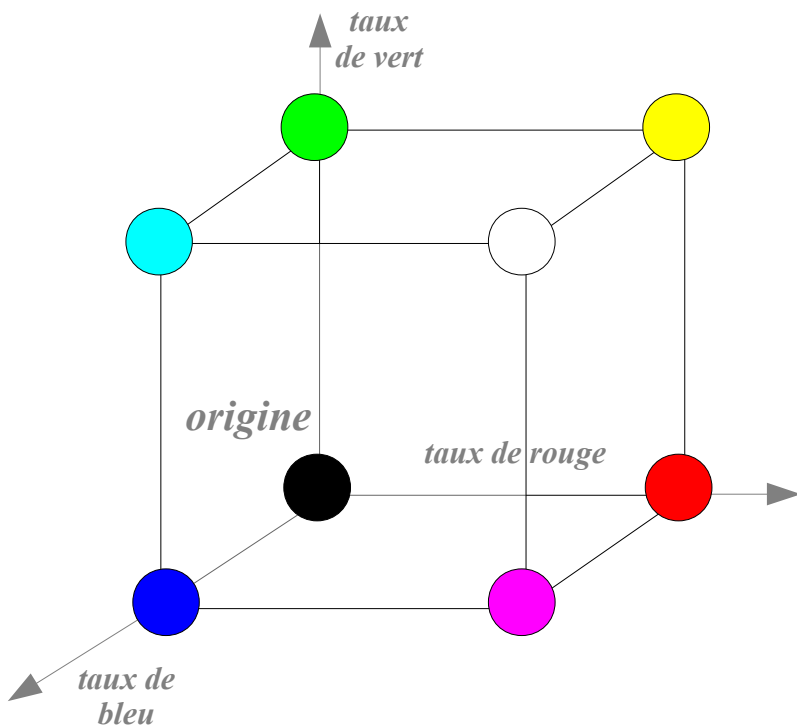
Matrice de Bayer

Dans les matrices de Bayer, noter que la résolution spatiale est différente de la résolution couleur, ce qui implique une interpolation de la valeur de chaque composante pour éviter les phénomènes d'aliasing de couleur.

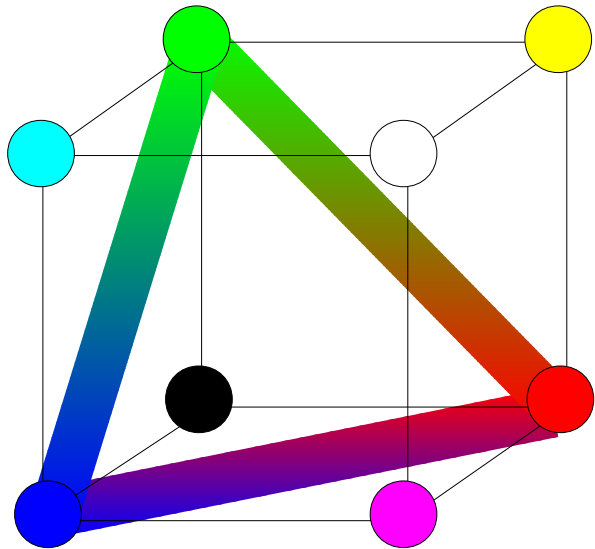


L'espace RGB

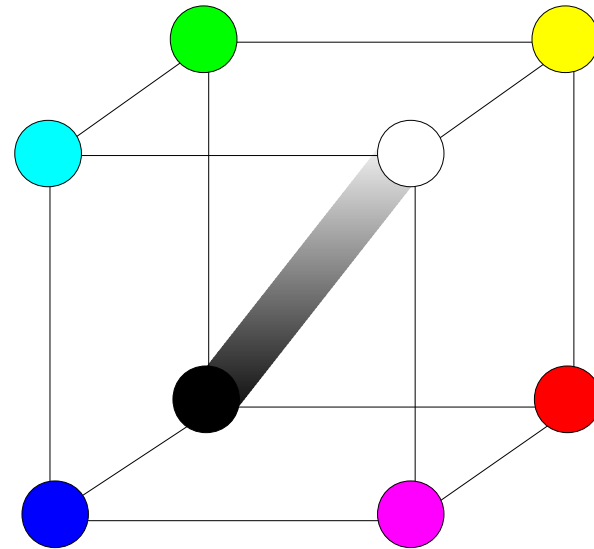
L'espace RGB est l'espace vectoriel engendré par les 3 composantes primaires (Rouge, Vert, Bleu). L'ensemble des couleurs produites se représente comme l'intérieur d'un cube :



L'espace RGB



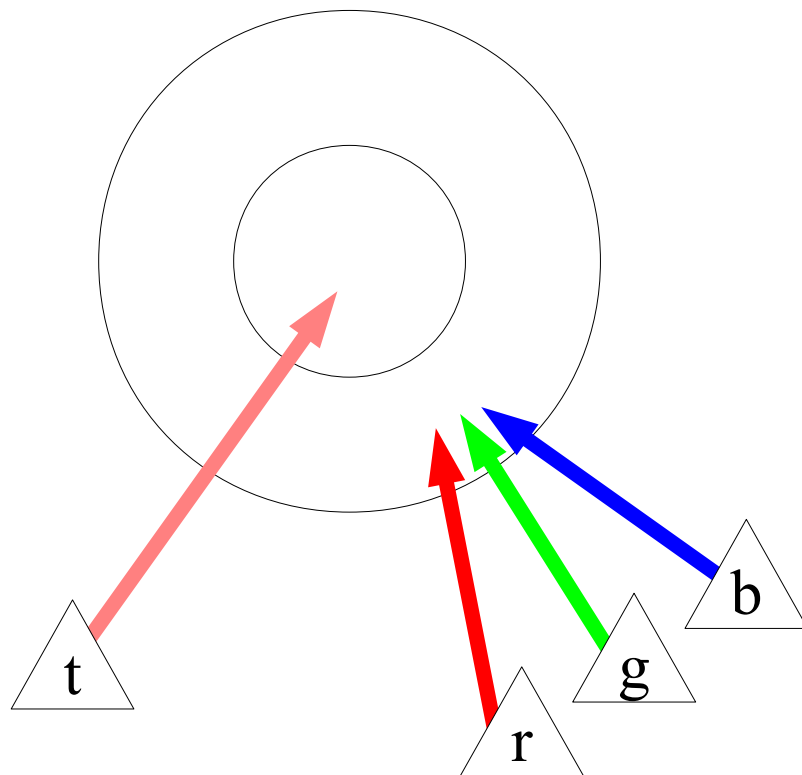
Triangle chromatique



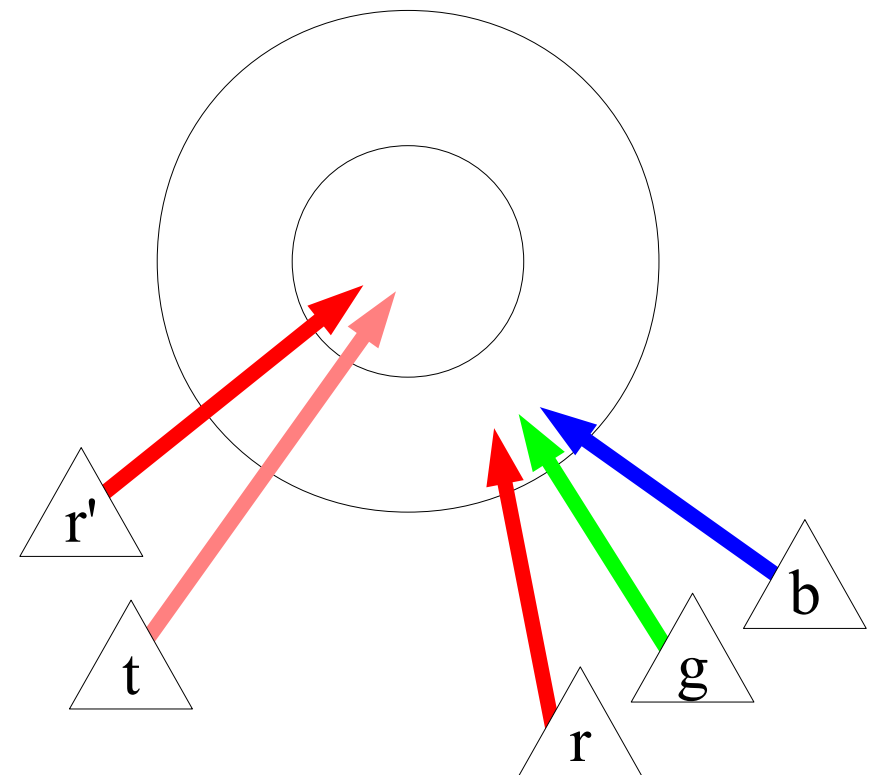
Axe achromatique

Limites de la trichromie

En réalité, les trois composantes RGB ne permettent pas de reconstituer vraiment toutes les couleurs perceptibles par l'œil humain :

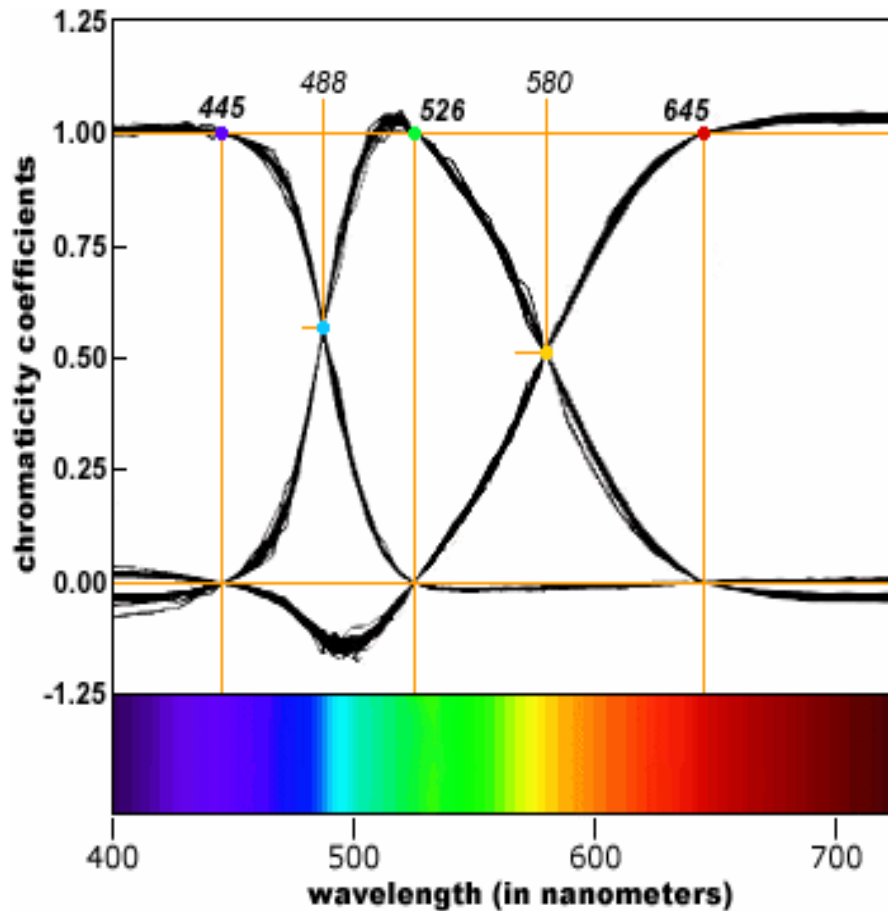


Expérience de « color matching » : une source lumineuse cohérente t est comparée à un mélange des 3 couleurs. On dose les taux (r,g,b) jusqu'à ce que les 2 zones soient perçues parfaitement identiques.

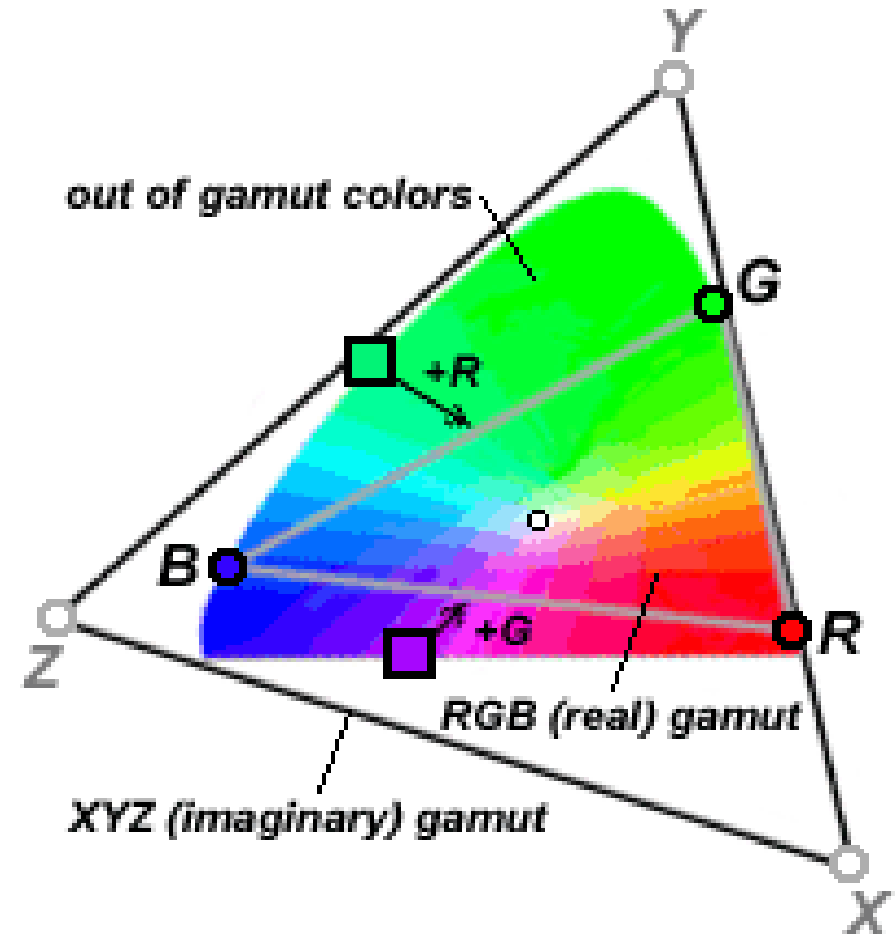


On observe que certaines couleurs cibles ne peuvent être reproduites par le triplet (r,g,b) , et qu'on n'obtient l'identité des couleurs qu'en ajoutant à la source cible t un certain taux d'une des composantes primaires. Ce taux r' intervient donc *négativement* dans l'expression de t .

Limites de la trichromie



Résultats de l'expérience de color matching sur un grand nombre de sujets.



Le triangle de Maxwell et le diagramme CIE.

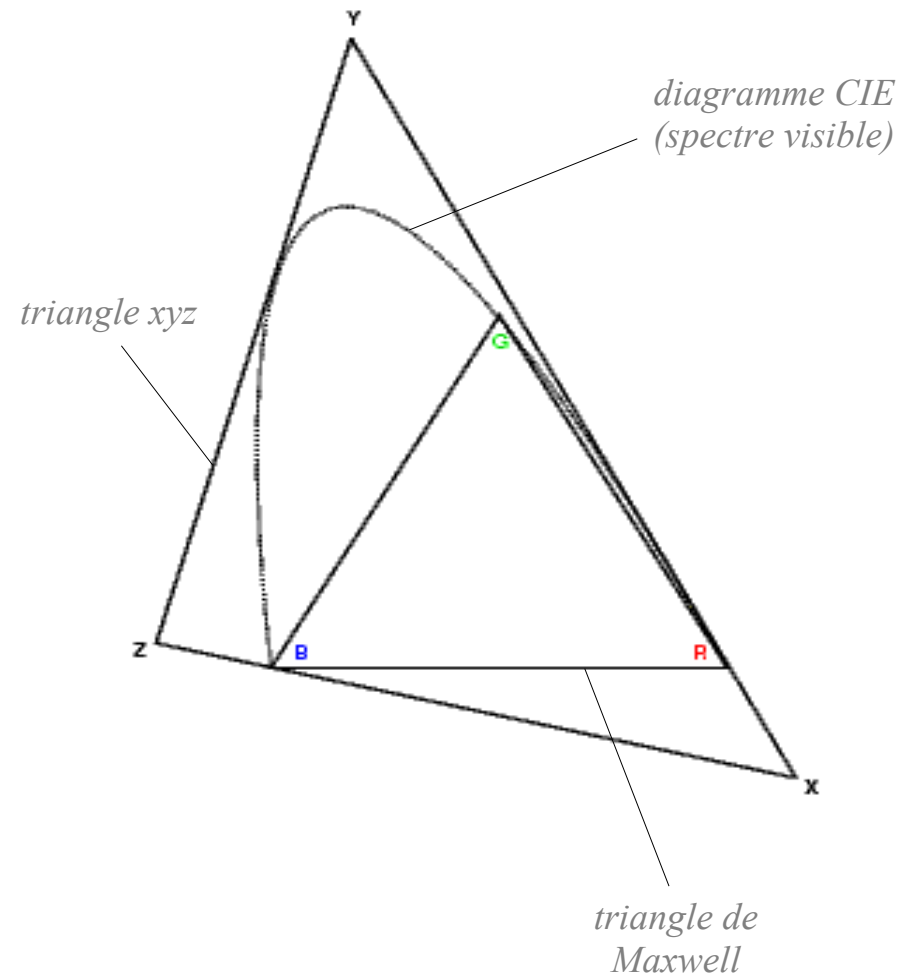
L'espace XYZ

L'espace XYZ (CIE 1931) est défini à partir d'une transformation linéaire sur l'espace RGB telle que toutes les couleurs du spectre visible soient contenues dans le triangle xyz.

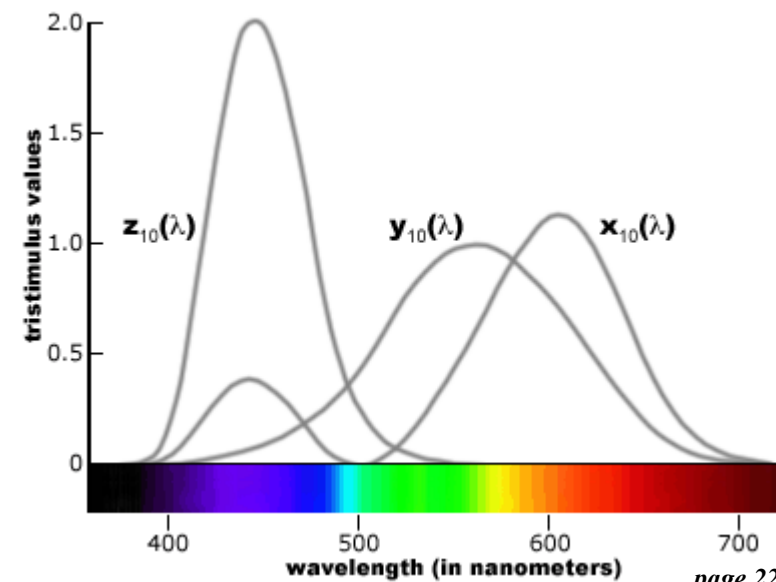
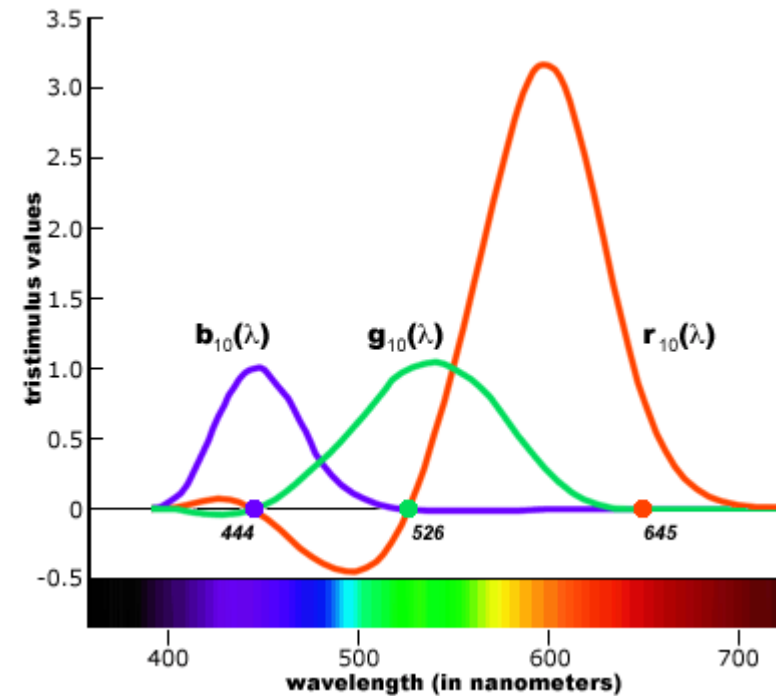
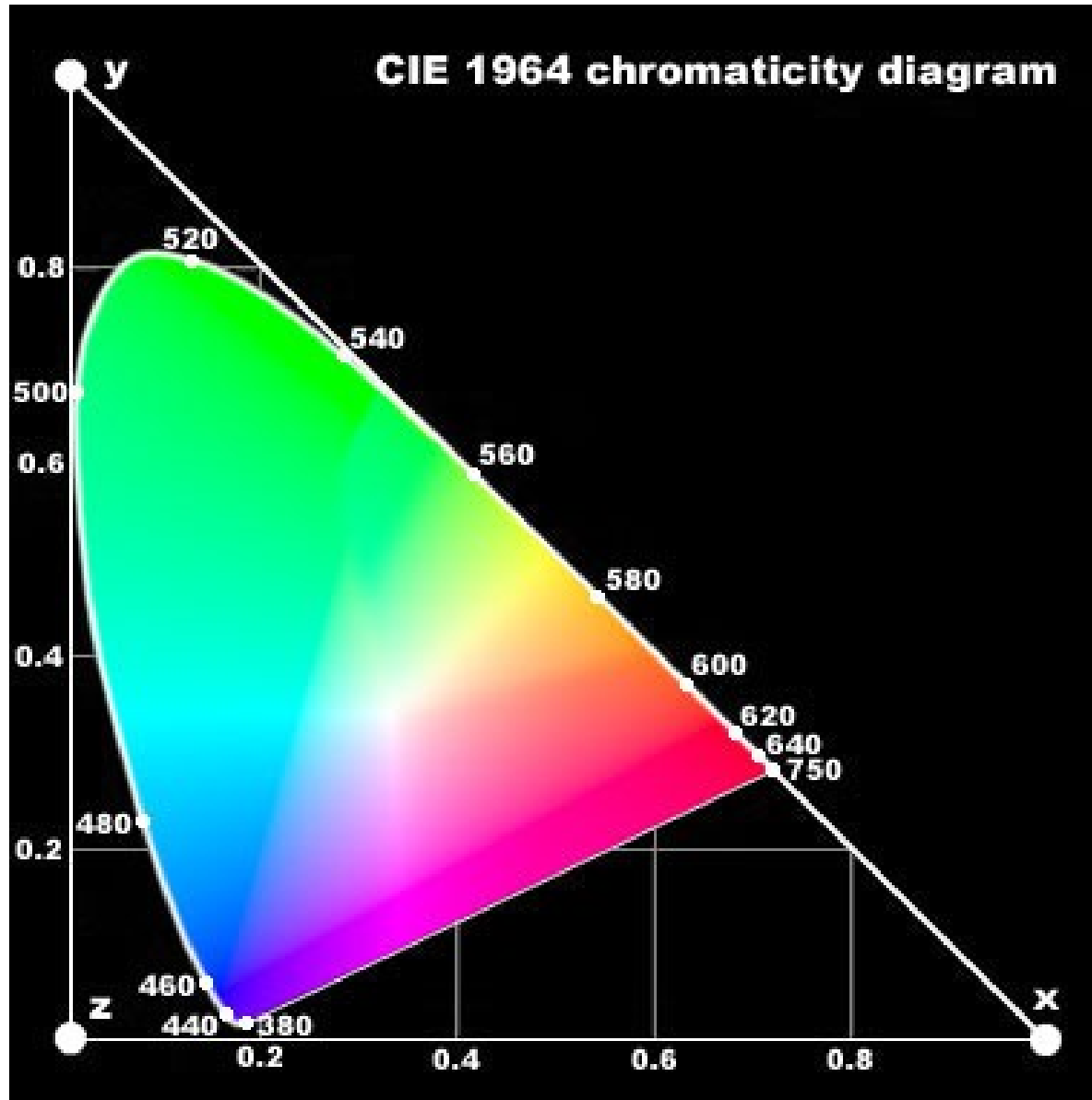
Les coordonnées XYZ des couleurs naturelles ont ainsi toujours des valeurs positives.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,769 & 1,7518 & 1,1300 \\ 1,0000 & 4,5907 & 0,0601 \\ 0,0000 & 0,0565 & 5,5943 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

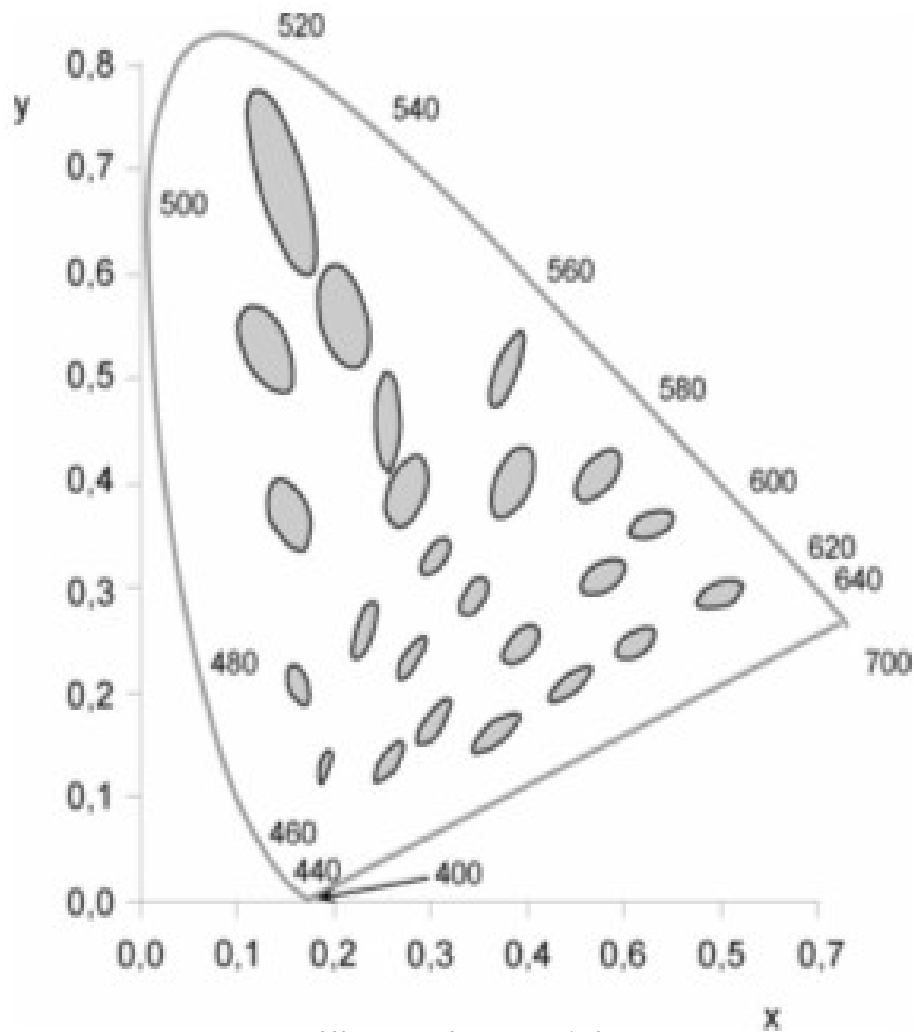
transformation des coordonnées RGB en coordonnées XYZ (sans normalisation)



L'espace XYZ



Classification des couleurs



ellipses de Mc Adam

- En terme de distance perceptuelle, l'espace XYZ n'est pas uniforme : on perçoit plus de nuances en x et z qu'en y.
- D'autre part, certaines dimensions descriptives de couleur : clair/foncé, pure/délavé ne sont pas accessibles directement.

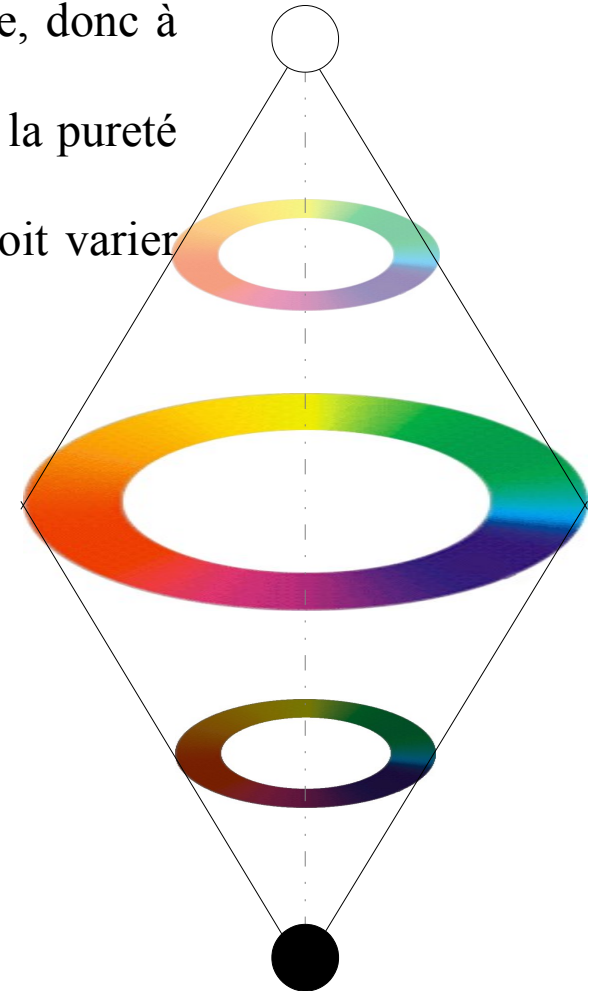
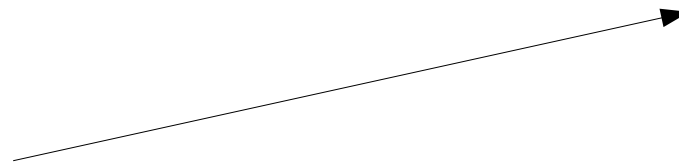
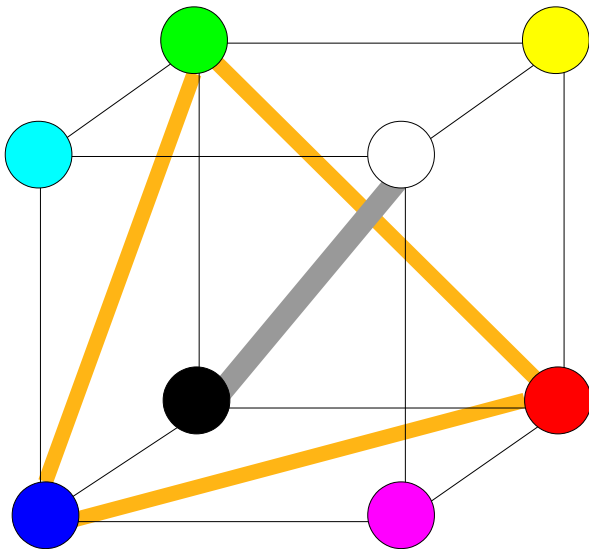
L'espace HSV

Le principe de l'espace HSV est de caractériser les couleurs de façon plus intuitive, conformément à la perception naturelle des couleurs, en termes de :

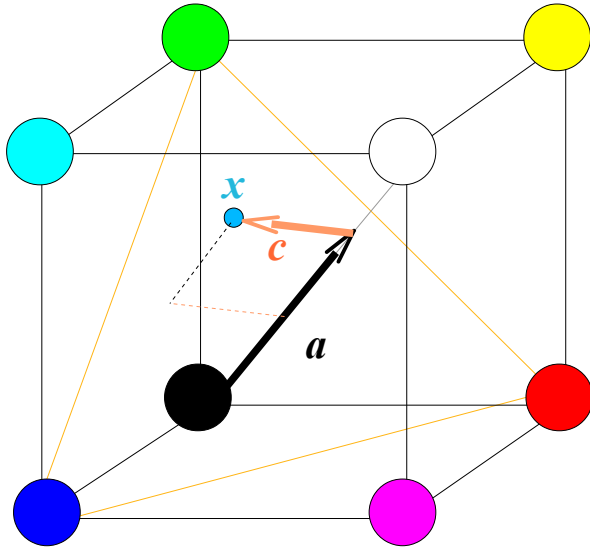
1 - teinte : intuitivement, c'est le nom qu'on utilisera pour désigner la couleur, "vert", "mauve", "orange", etc. Idéalement associé à une longueur d'onde, donc à une position sur le cercle de Newton.

2 - saturation : c'est le taux de pureté de la couleur, qui doit varier entre la pureté maximale (couleur éclatante) et l'achromatisme (niveau de gris).

3 - valeur : c'est la mesure de l'intensité lumineuse de la couleur, qui doit varier entre le noir absolu et le blanc.



L'espace HSV

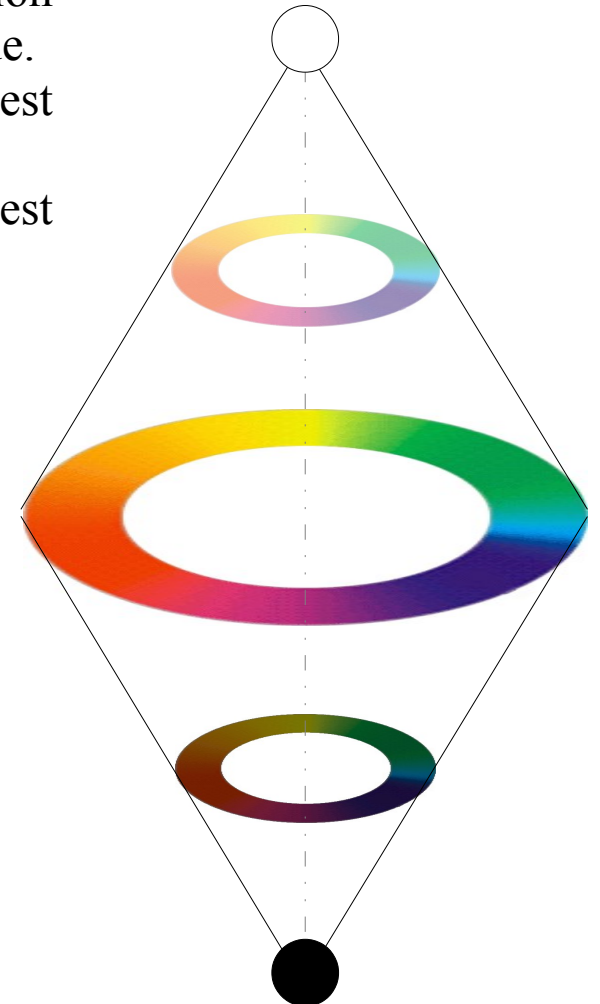


Un point x de coordonnées (r,g,b) du cube RGB peut être décomposé en deux composantes (c,a) . Soit y la projection orthogonale de x sur l'axe achromatique.

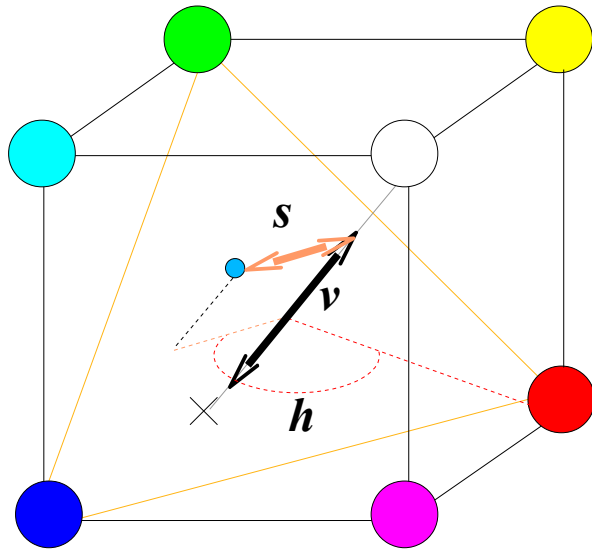
- Une composante chromatique c : c'est le vecteur yx .
- Une composante achromatique a : c'est le vecteur Oy .

Cette décomposition permet d'associer les composantes HSV à des grandeurs géométriques :

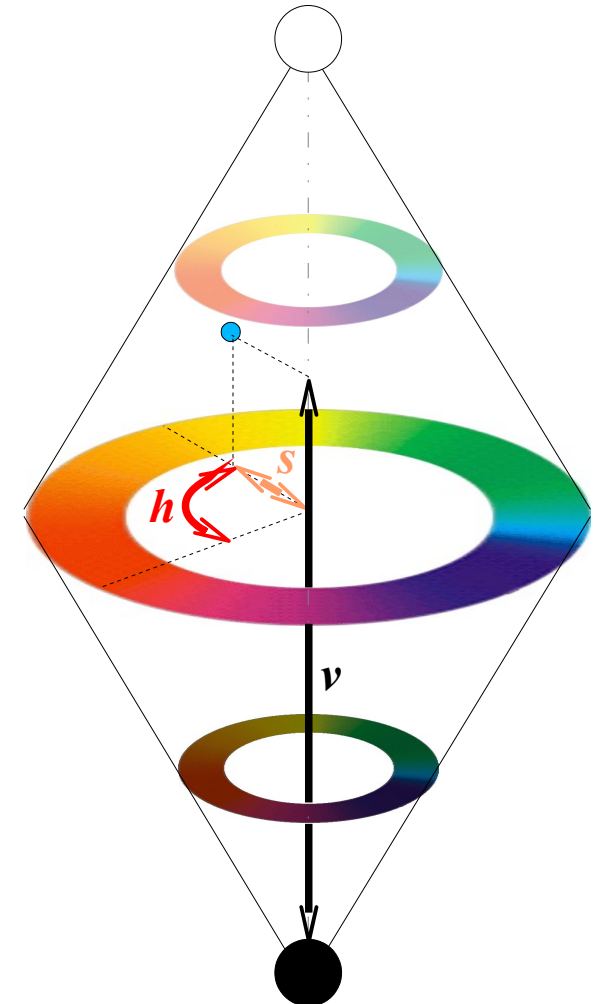
- *la valeur* : c'est le module de la composante achromatique $\|\mathbf{a}\|$
- *la saturation* : c'est le module de la composante chromatique $\|\mathbf{c}\|$
- *la teinte* : c'est l'argument (par référence à une direction arbitraire du triangle chromatique), de la composante chromatique $\arg(\mathbf{c})$.



L'espace HSV



Le passage de RGB à HSV se fait par une transformation non linéaire. Plusieurs opérateurs ont été proposés pour la conversion. Voici un exemple :



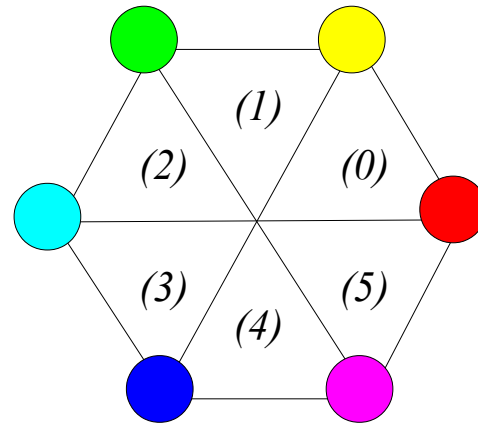
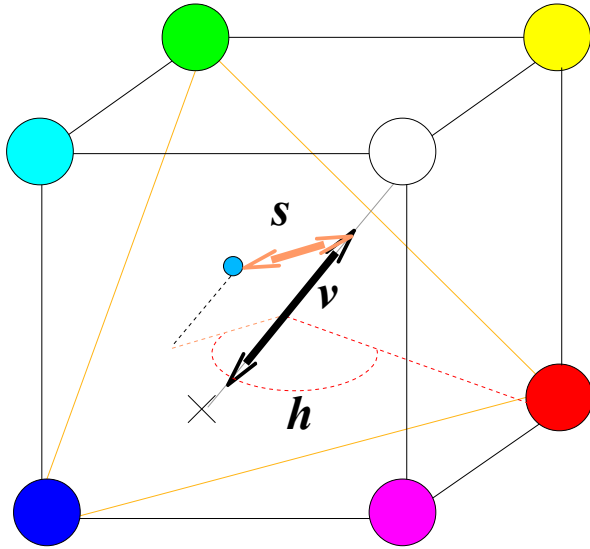
$$v = \frac{r + g + b}{3}$$

$$s = 1 - \frac{3 \min(r, g, b)}{r + g + b}$$

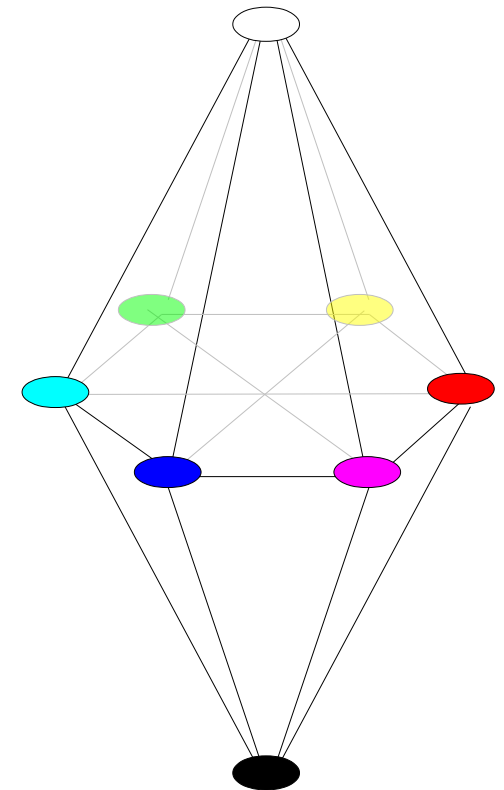
$$h = \begin{cases} \theta & \text{si } b \leq g \\ 2\pi - \theta & \text{si } b > g \end{cases} \quad \theta = \arccos\left(\frac{(r-g) + (r-b)}{2\sqrt{(r-g)^2 + (r-b)(g-b)}}\right)$$

L'espace HSV

Voici un autre exemple, sans l'Arc Cosinus :



L'hexagone chromatique et les valeurs de λ associées.



$$v = \frac{r + g + b}{3}$$

$$s = \begin{cases} \frac{3}{2}(M - v) & \text{si } v \geq \text{med} \\ \frac{3}{2}(v - m) & \text{si } v \leq \text{med} \end{cases} \quad \begin{cases} M = \max(r, g, b) \\ m = \min(r, g, b) \\ \text{med} = \text{mediane}(r, g, b) \end{cases}$$

$$h = \frac{\pi}{3} \left(\lambda + \frac{1}{2} - (-1)^\lambda \frac{M + m - 2 \text{med}}{2v} \right); \lambda = \begin{cases} 0 & \text{si } r \geq g \geq b; 1 & \text{si } g \geq r \geq b \\ 2 & \text{si } g \geq b \geq r; 3 & \text{si } b \geq g \geq r \\ 4 & \text{si } b \geq r \geq g; 5 & \text{si } r \geq b \geq g \end{cases}$$



Image couleur



Composante valeur



Image couleur



Composante saturation



Image couleur



Composante teinte

(On voit l'effet de la quantification de couleurs réalisée lors de la compression)

Un autre exemple, sans compression Jpeg...

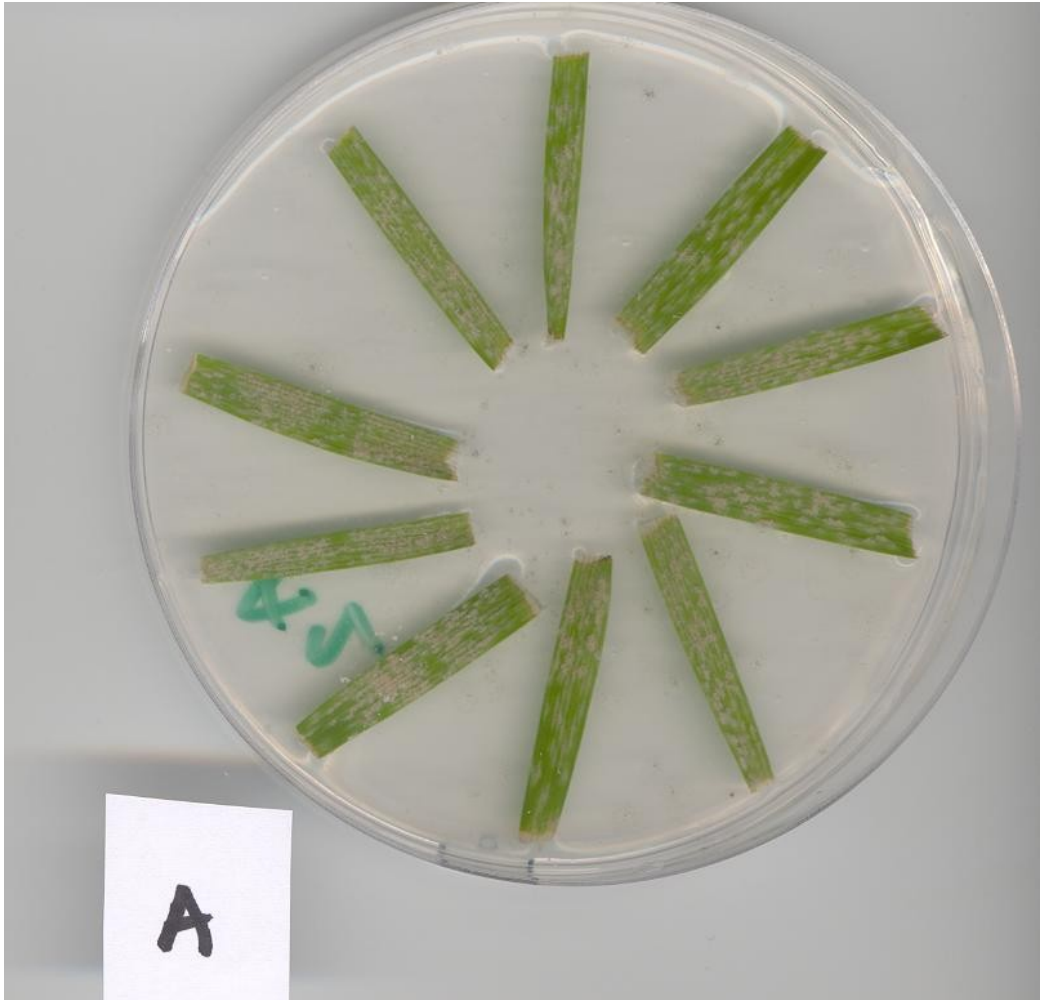
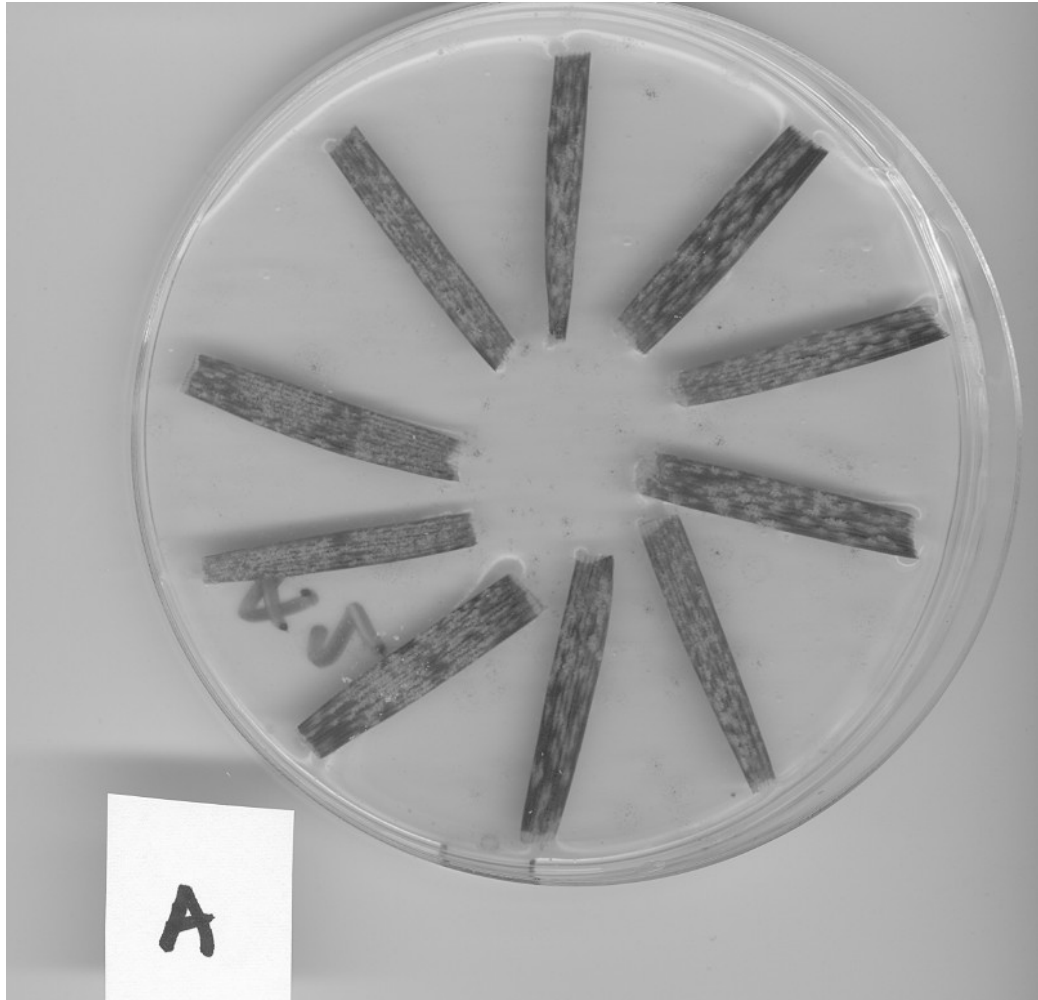


Image couleur



Composante valeur

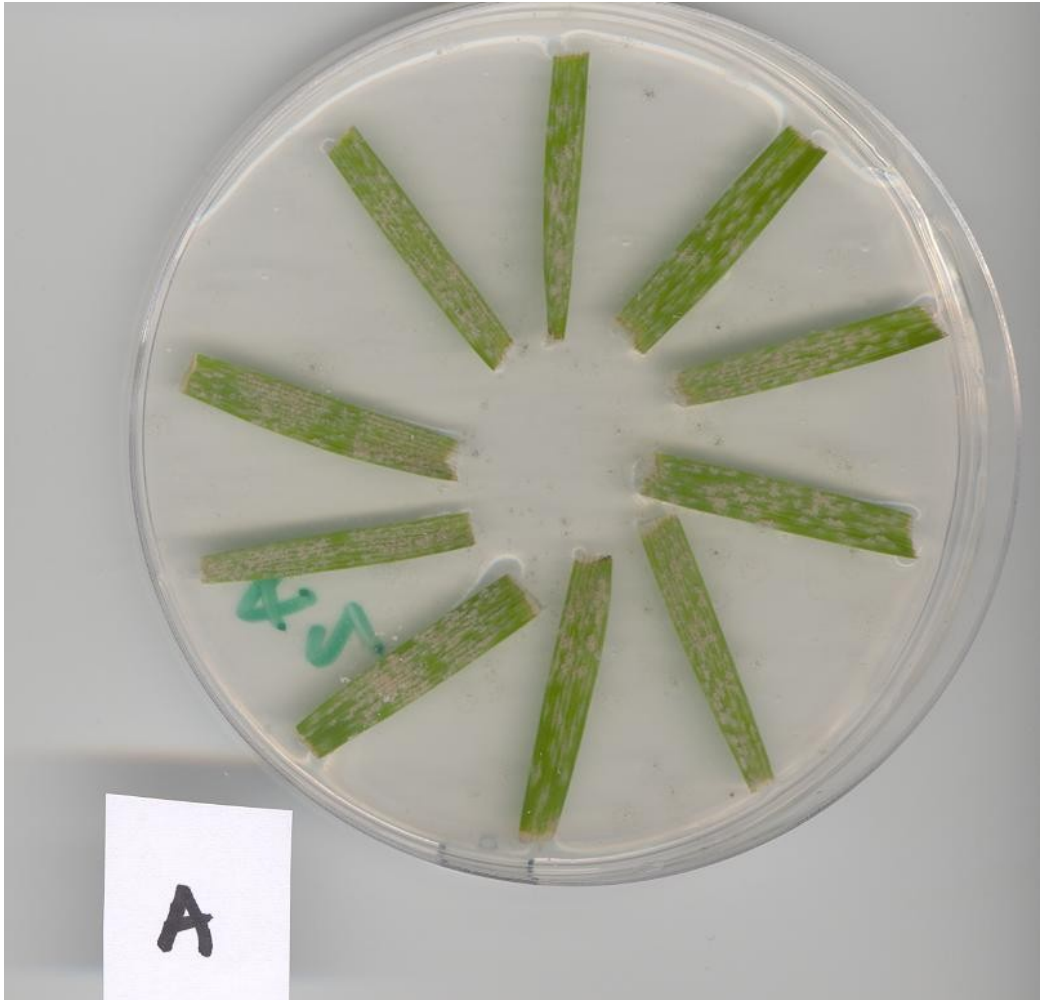


Image couleur



Composante saturation

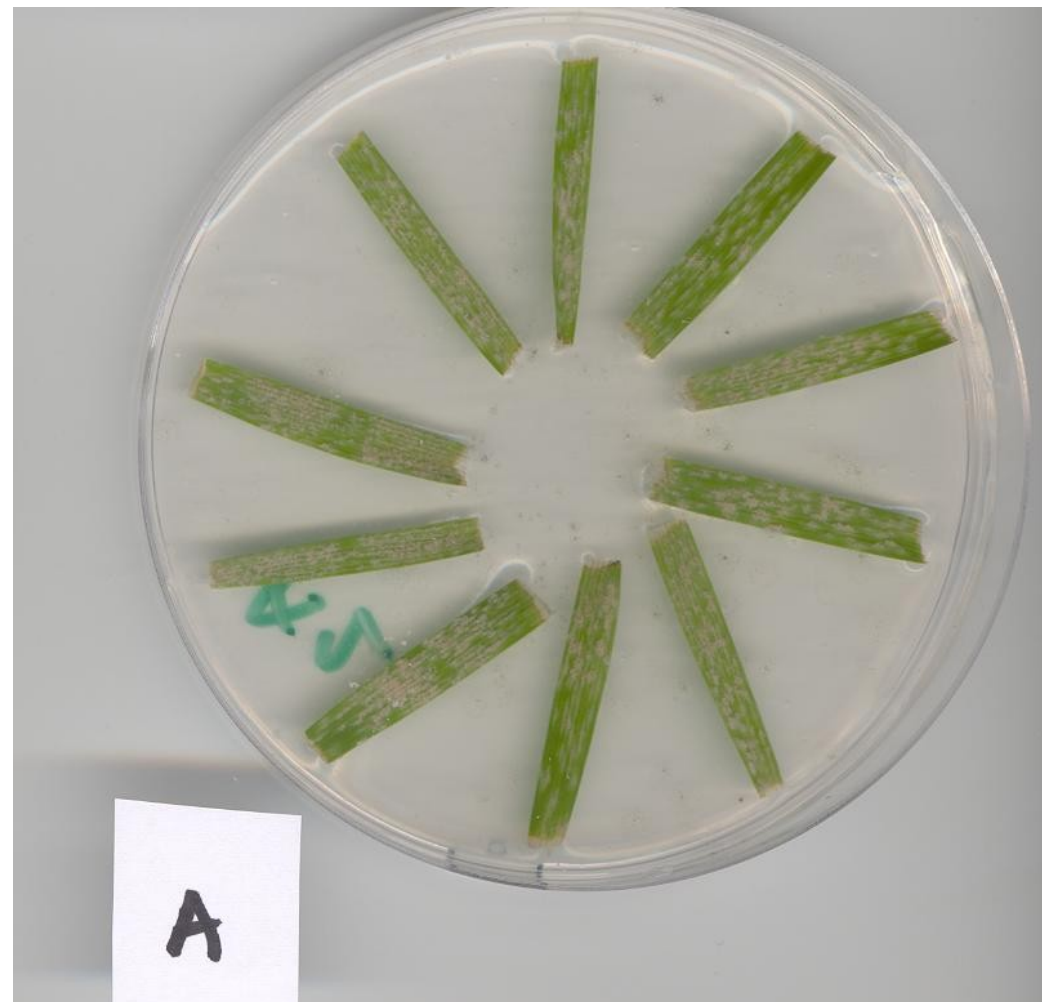
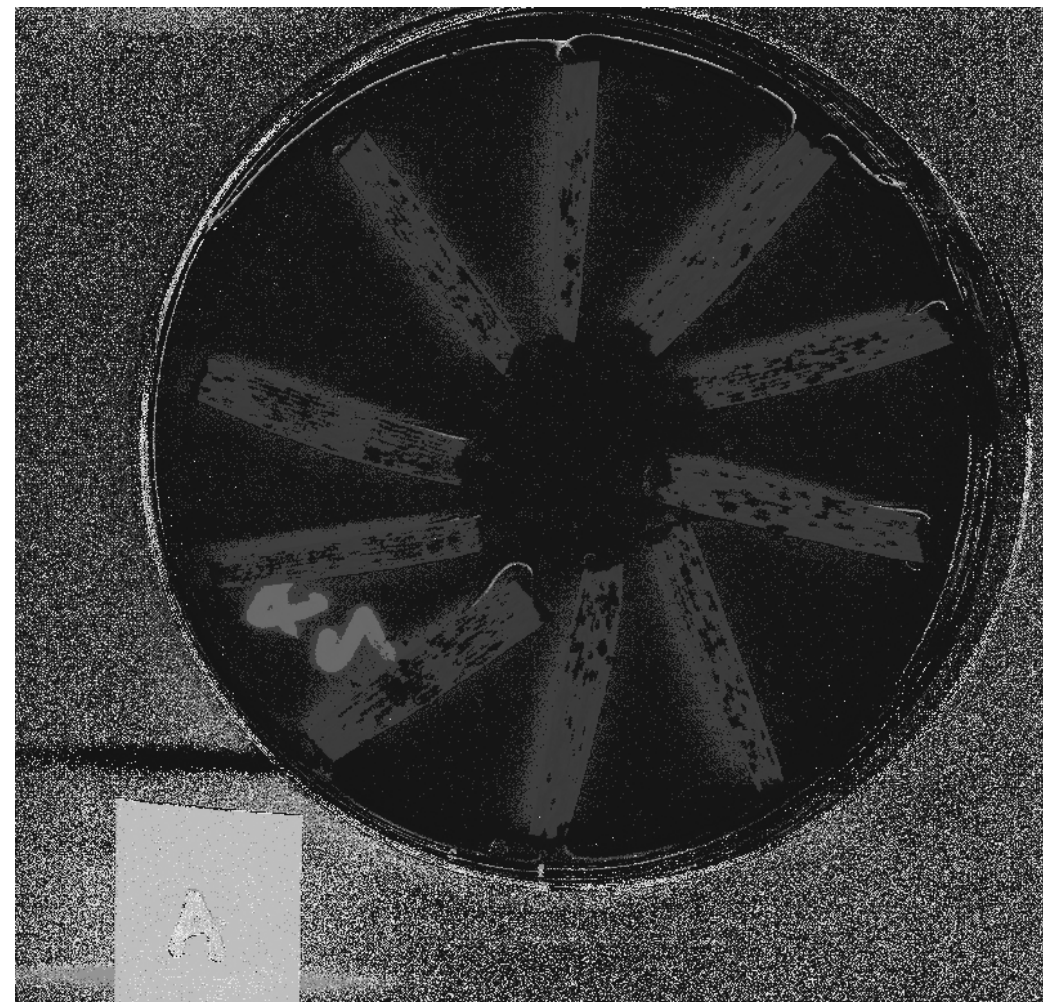


Image couleur

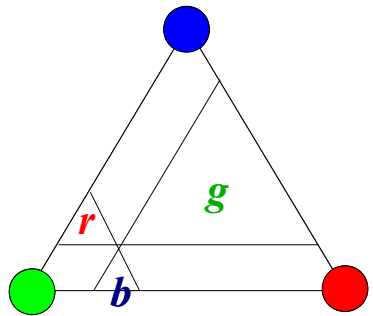


Composante teinte

La teinte n'est pas significative pour les régions peu saturées, très claires, ou très sombres.

L'espace Yuv

Le principe de l'espace Yuv est de représenter les couleurs en utilisant une composante de *luminance* Y , et 2 composantes de *chrominance* (u, v) correspondant aux composantes *bleue* et *rouge* dans les coordonnées chromatiques réduites :



$$Cb + Cr + Cg = Cte$$

$$Cg = Cte - Cb - Cr$$

La composante de luminance est une moyenne pondérée par la sensibilité humaine relative des primaires.

$$0 \leq Y \leq N_{max}$$

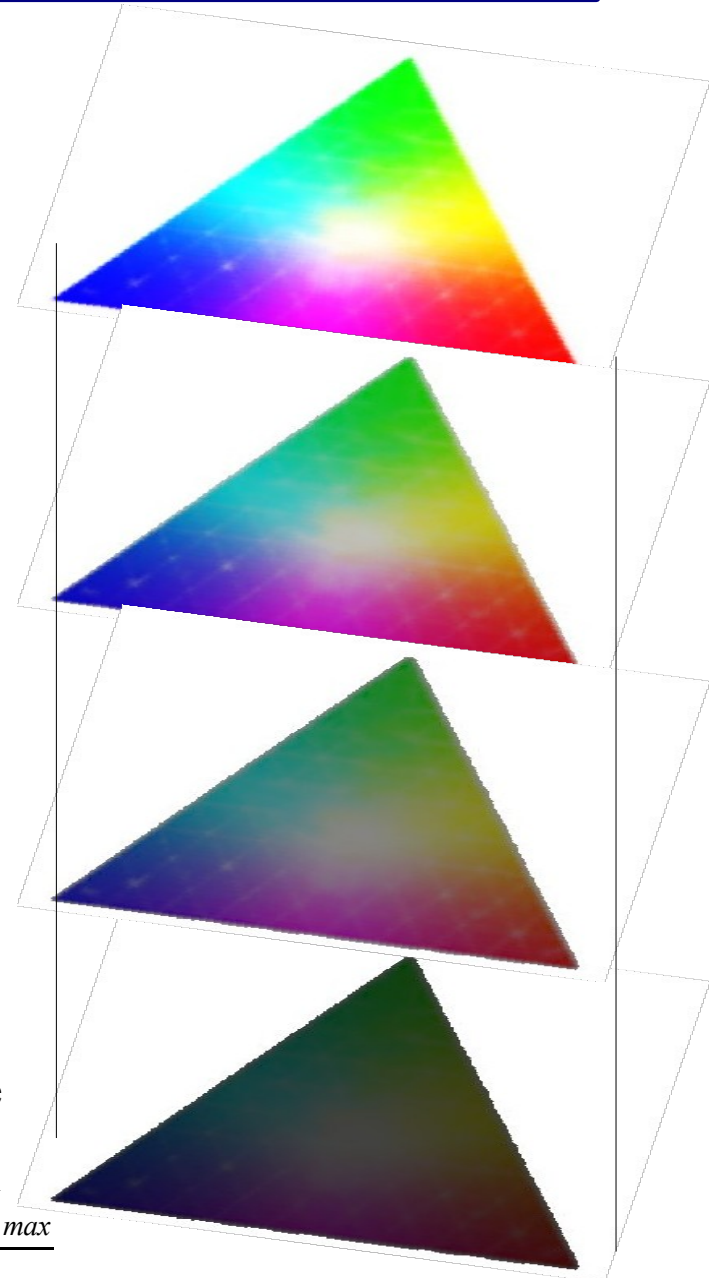
$$Y = 0,2989 r + 0,5866 g + 0,1145 b$$

$$u = 0,5647(b - Y) = -0,1687 r - 0,3312 g + 0,5000 b$$

$$v = 0,7132(r - Y) = 0,5000 r - 0,4183 g - 0,0817 b$$

Les composantes de chrominance correspondent à la différence normalisée entre la composante primaire et la luminance.

$$\frac{-N_{max}}{2} \leq u \leq \frac{+N_{max}}{2} \quad \frac{-N_{max}}{2} \leq v \leq \frac{+N_{max}}{2}$$



L'espace Yuv

Les composantes de chrominance u et v représentent respectivement le contraste Bleu/Jaune et le contraste Rouge/Cyan.

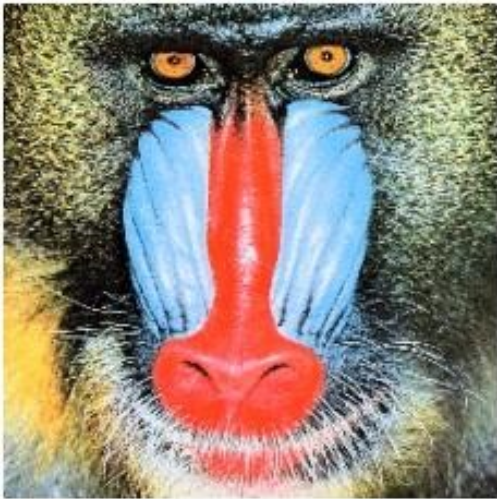
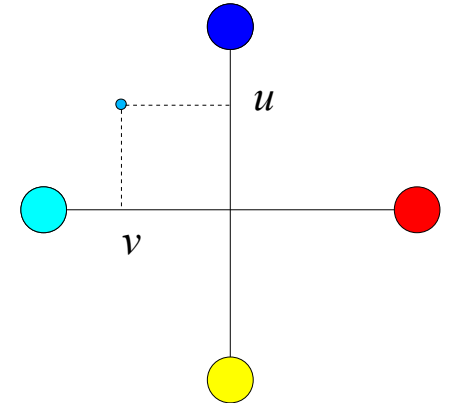
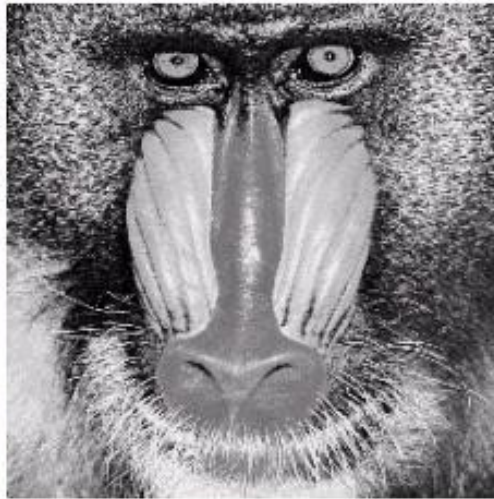
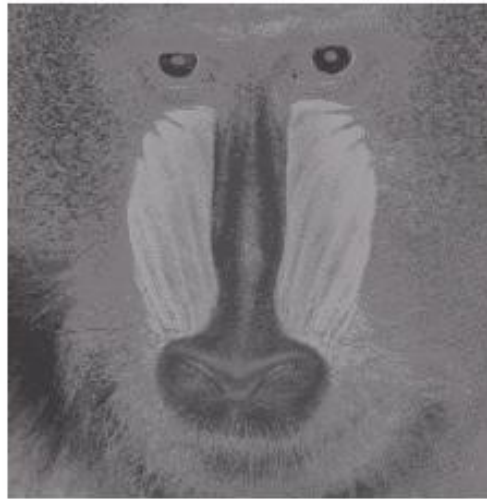


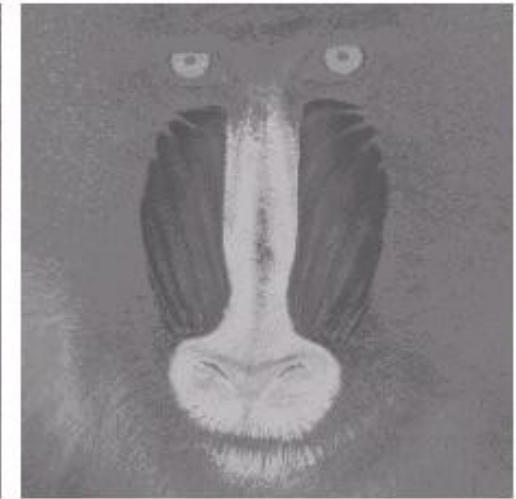
Image couleur



Luminance Y



Chrominance bleue u



Chrominance rouge v

Traitements d'images couleur

PLAN DE CETTE PARTIE :

- Opérations linéaires
- Filtres non linéaires
- Opérateur de contraste
- Détection des ombres

Filtres linéaires couleurs

Un opérateur linéaire couleur est défini dans une base vectorielle par une matrice 3x3 d'opérateurs linéaires scalaires. Les opérateurs linéaires couleurs invariants par translation sont donc décrits par une matrice de convolutions :

Cas général

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix}$$

Traitement marginal

$$F = \begin{pmatrix} f_1 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 & 0 \\ 0 & 0 & f_3 \end{pmatrix}$$

Traitement identique

$$F = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & f \end{pmatrix}$$



ex : filtre gaussien appliqué sur les 3 composantes RGB.

Opérations non linéaires

Même si, formellement, rien n'empêche d'utiliser des opérateurs non linéaires marginalement sur chaque composante d'un espace vectoriel, il faut être prudent sur l'interprétation du vecteur résultant.

Par exemple, dans le cas des filtres d'ordre (et donc des opérateurs morphologiques), la relation d'ordre dans l'espace couleur n'existe pas a priori. Le résultat de l'érosion ou de la dilatation calculée par composante a peu de choses à voir avec l'érosion ou la dilatation...

On peut fixer explicitement un ordre sur l'espace vectoriel (e.g. lexicographique).

On peut aussi appliquer différents opérateurs sur les composantes (e.g. érosion sur Y , (u,v) constant, etc.)

Contraste couleur

Comment caractériser les variations spatiales d'une image couleur $I = (I_1, I_2, I_3)$?

Les 2 colonnes de la matrice Jacobienne de I par rapport à (x,y) sont les dérivées partielles directionnelles. Ce sont des images couleurs qui ont un sens car les dérivées partielles sont des opérateurs linéaires :

$$I^x = \left(\frac{\partial I_1}{\partial x}, \frac{\partial I_2}{\partial x}, \frac{\partial I_3}{\partial x} \right)$$

Les 3 lignes de la matrice Jacobienne sont les vecteurs gradients des 3 composantes. Ces grandeurs ont aussi un sens en tant que mesure des variations des composantes :

$$\nabla I_k = \left(\frac{\partial I_k}{\partial x}, \frac{\partial I_k}{\partial y} \right)$$

Mais quel sens aura la notion de gradient couleur ? En terme de contraste (module), on utilise souvent une approche en 2 temps :

$$GI = (\|\nabla I_1\|_1, \|\nabla I_2\|_1, \|\nabla I_3\|_1) \quad \xrightarrow{\quad} \quad \|I\|_d = \|GI\|_2$$

La norme (1) est une norme L_1 , L_2 ou L_∞ ; la norme 2 est souvent la norme L_∞ .

Contraste couleur



I



I^x



$$\frac{\partial r}{\partial x}$$



$$\frac{\partial g}{\partial x}$$



$$\frac{\partial b}{\partial x}$$

Contraste HSV

Dans les espaces HSV, on peut utiliser la *saturation* comme *pondération* pour calculer une norme de gradient couleur par combinaison linéaire des normes des gradients de la luminance et de la teinte :

$$\|I\|_{d'} = \frac{S}{K} \|\nabla H\|_1 + \frac{K-S}{K} \|\nabla V\|_1$$



V



S



$\|\nabla V\|_1$



$\|\nabla H\|_1$



$\|I\|_{d'}$

Détection des ombres

La couleur permet de détecter plus facilement les ombres grâce aux invariants couleurs, i.e. les quantités qui ne changent pas si on diminue l'intensité de la source d'éclairage. Le principe est que dans les zones ombrées, les 3 composantes RGB diminuent de manière identique. On peut par exemple utiliser : les coordonnées chromatique (u,v) ou les coordonnées (r,g,b) réduites (normalisées).



Cas statique : on compare les invariants au voisinage des *contours des ombres portées*.



Cas dynamique : on compare les invariants dans la *dimension temporelle*.

Biblio / Webo-graphie

- Horn, B.K.P « Determining lightness from an image » Computer graphics and image processing 3(1) 277-299 (1974)
- Brun, L. « Traitement d'images couleur »
http://www.greyc.ensicaen.fr/ensicaen/CoursEnLigne/Cours_TIC.ps (2003)
- Metz D. « Comprendre la couleur et ses profils » <http://www.profil-couleur.com/index.htm>
- Angulo, J. et Serra J. « Traitement des images de couleur en représentation l/s/t par norme L_1 »
Traitement du Signal 21(6) 583-604 (2004)
- Coll. University of Haïfa « Shadow Removal – Computer vision seminar »
<http://cs.haifa.ac.il/hagit/courses/seminar/shadowRemoval/shadowRemovalPapers.html>

Conclusion

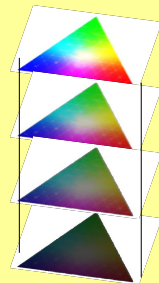
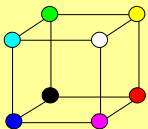
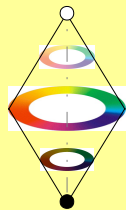
A retenir pour ce cours :

(1) Ombres propres / Ombres portées

Filtrage homomorphique / Invariants couleurs

(2) Les espaces couleurs

- RGB
- XYZ
- HSV
- Yuv



(3) Traitements couleurs

- Filtres linéaires
- Filtres non linéaires
- Mesure du contraste

