

Colorimétrie Radiométrie Photométrie

Xavier Granier <xavier.granier@institutoptique.fr>

Julien Moreau <julien.moreau@institutoptique.fr>

Laurent Cognet <laurent.cognet@institutoptique.fr>

Romain Pacanowski <romain.pacanowski@institutoptique.fr>

C'est quoi une couleur ?

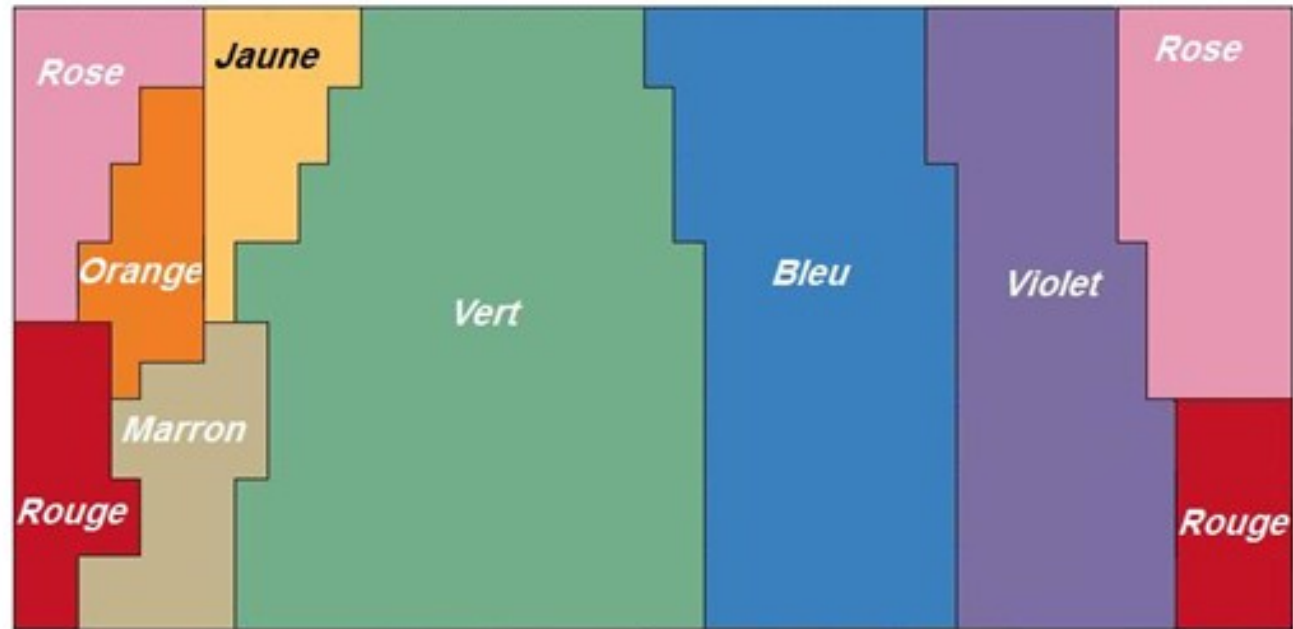
- Sémantique
 - Nom et catégorie
- Perception
 - Système visuel humain
- Projection
 - Extension de la définition précédente

Couleur d'un point de vue sémantique

JAUNE	BLEU	ORANGE
NOIR	ROUGE	VERT
VIOLET	JAUNE	ROUGE
ORANGE	VERT	NOIR
BLEU	ROUGE	VIOLET
VERT	BLEU	ORANGE

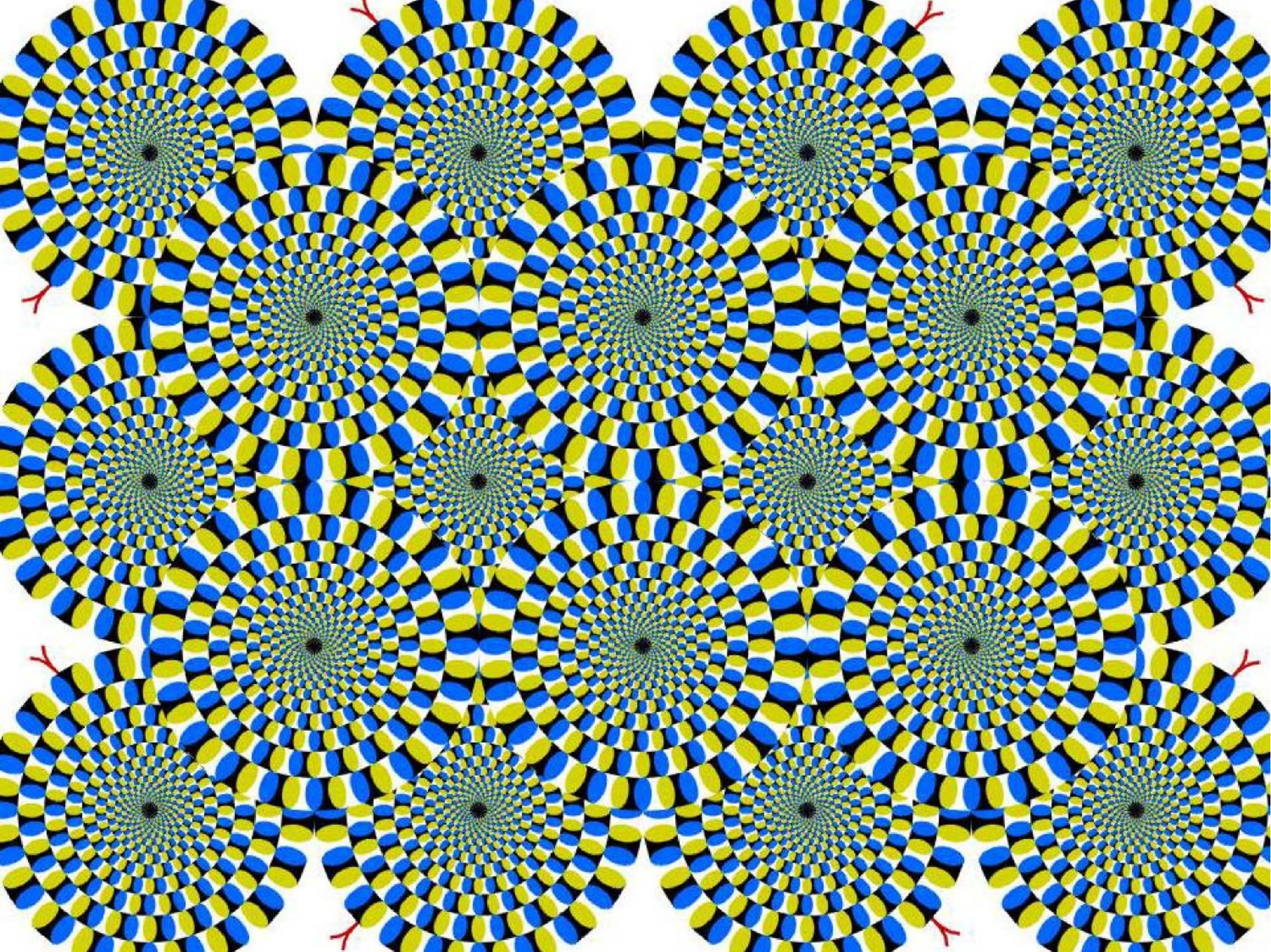
Catégories de couleur

chez les occidentaux



http://www.laplaneterevisitee.org/fr/190/identification_des_couleurs_chez_les_papous





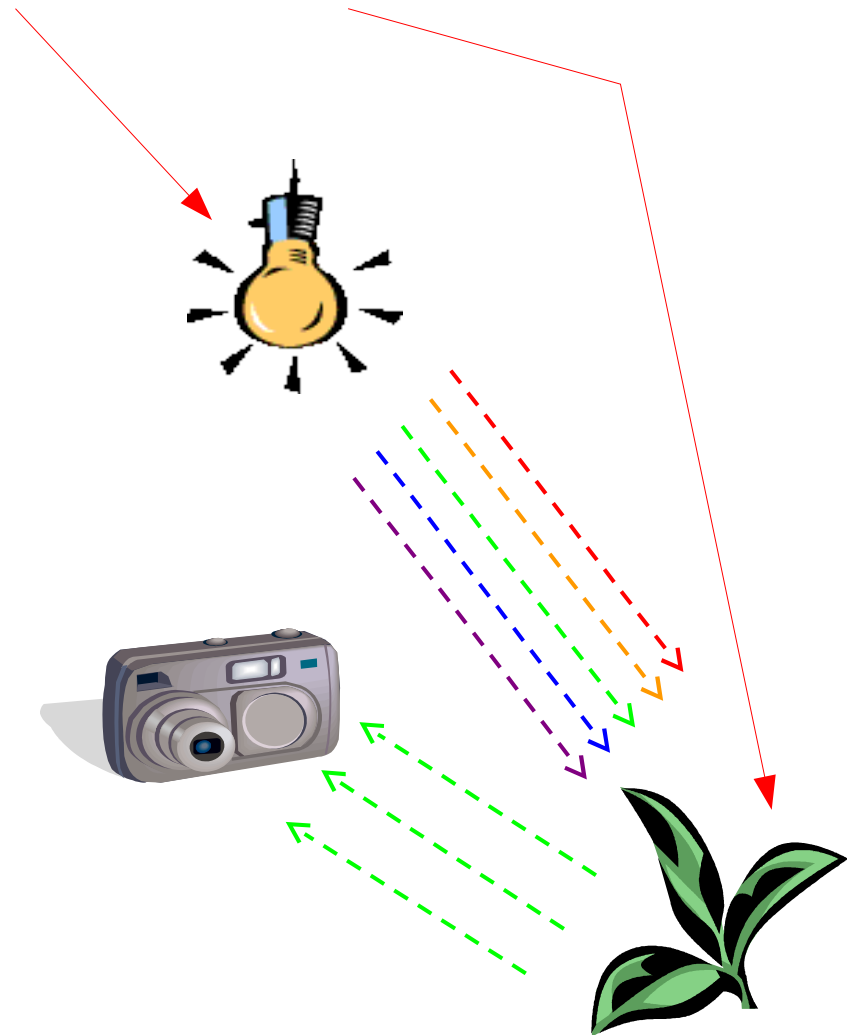
Différents sens de la couleur

- Dans le langage, une couleur c'est :
 - Un pigment
 - Propriété de réflexion / absorption spectrale
 - Même principe qu'un filtre coloré
 - Sans dimension ou sr^{-1}
 - La mesure sur un capteur
 - CCD,
 - Irradiance !
 - Ce que l'on voit d'un objet
 - Exitance, Luminance sortante
- Certaines conditions → on peut associer les 3

Définition couleur (mesure)

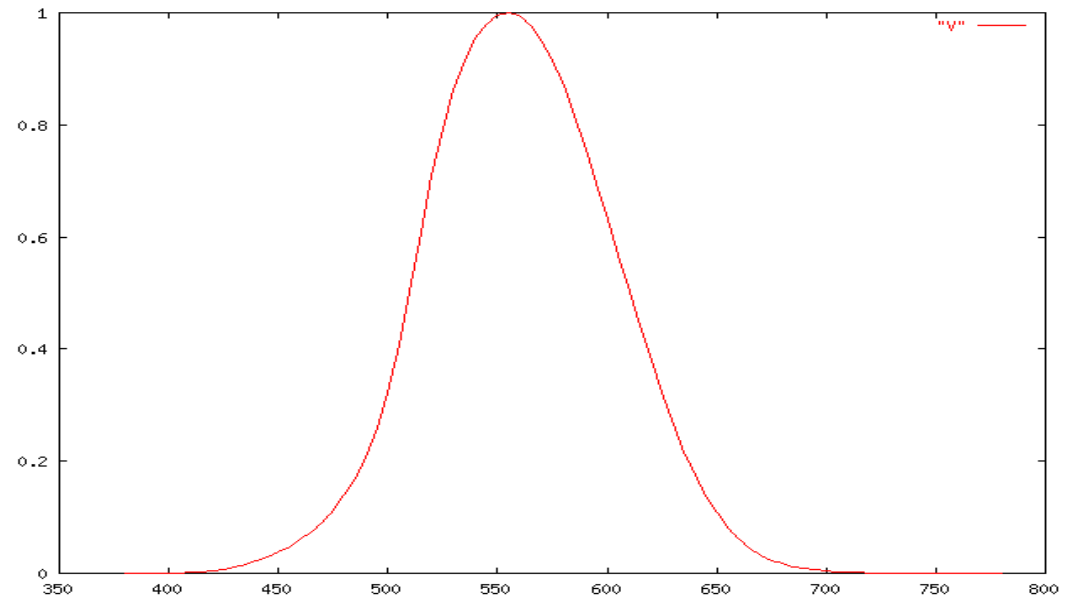
couleur = **ColorFunction**(éclairage x objet)

- Éclairage
 - Donnée spectrale
 - Éclairage possible
- Objet
 - Propriétés de réflexion
 - Donnée spectrale
 - Absorption, transmission ...
 - Multiples réflexions
- ColorFunction
 - Caractéristique du capteur
 - Numérisation (valeurs discrètes)
 - Espace de Couleur
 -

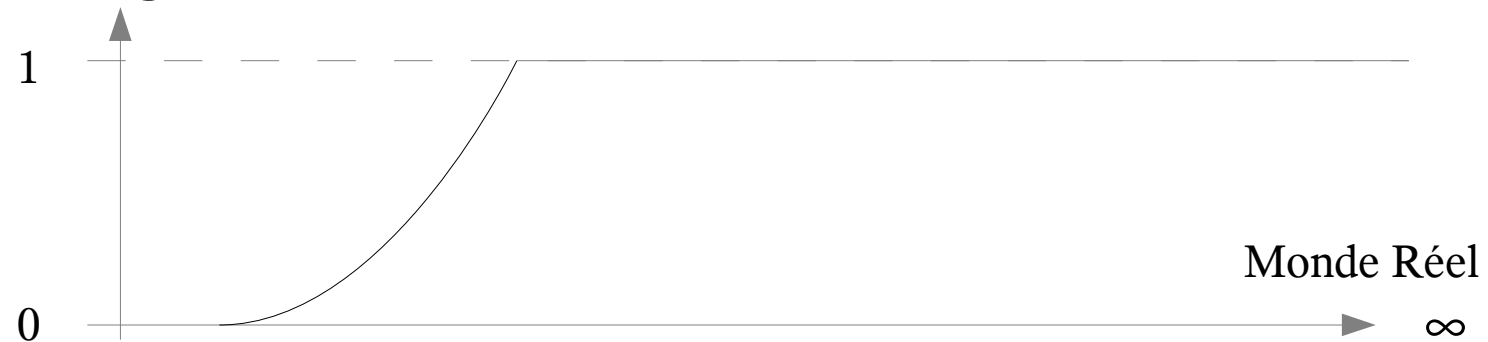


Exemples de caractéristiques de capteur

- Réponse spectrale



- Réponse énergétique



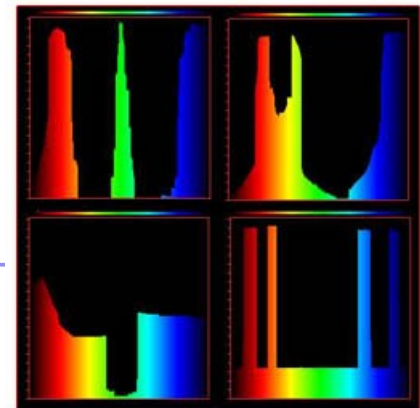
Attention, ne pas confondre



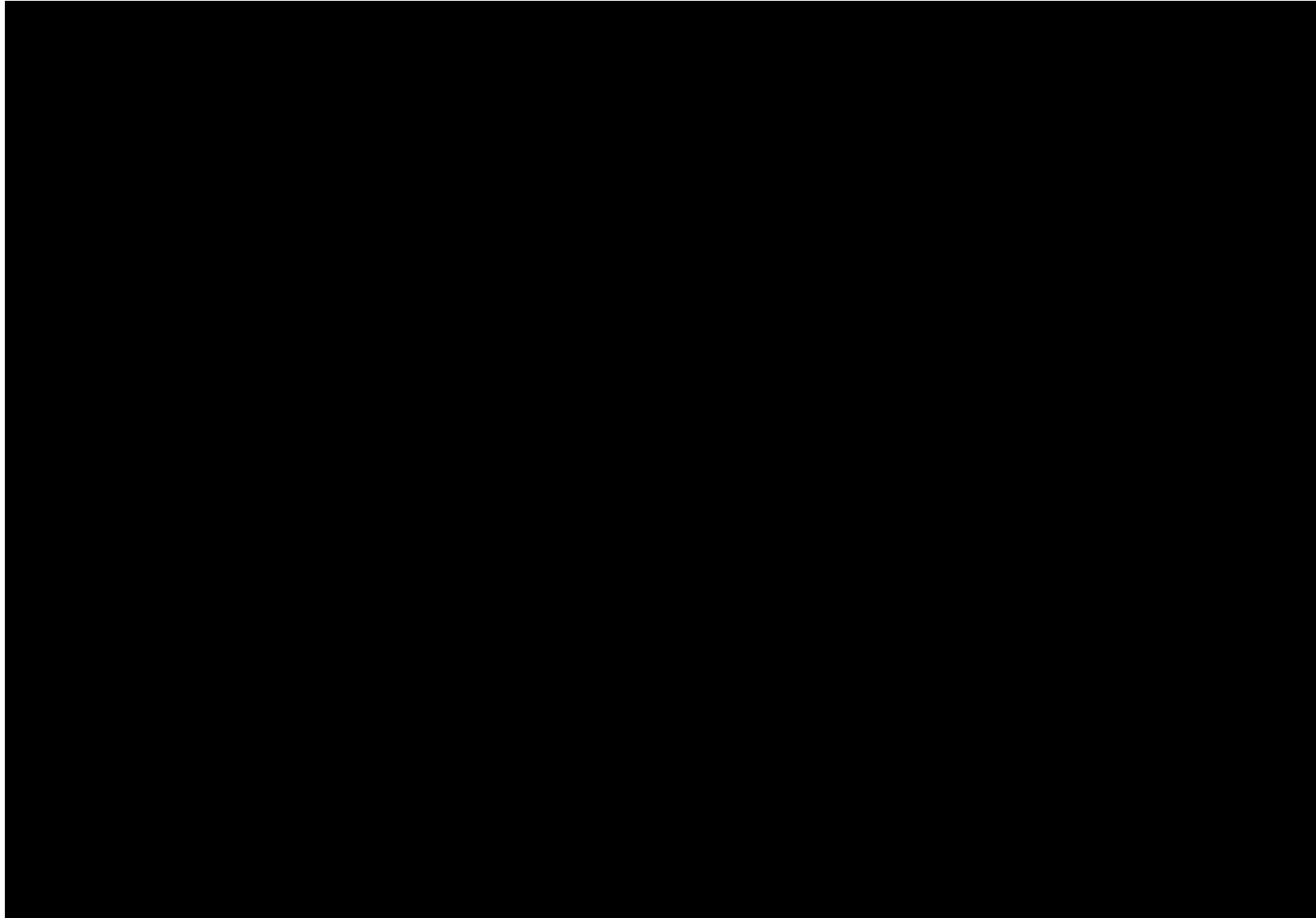
- Couleur et
 - Longueur d'onde
 - (Spectre)
- ColorFunction
 - Pas bijective

Notion de métamère

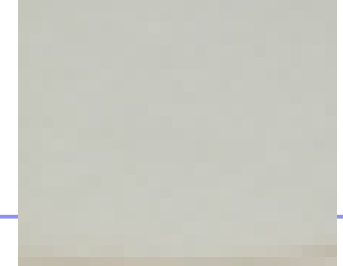
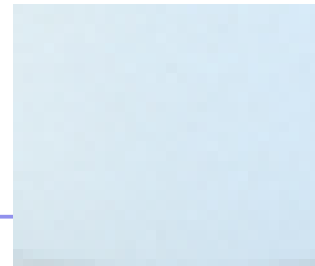
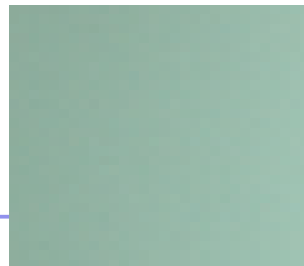
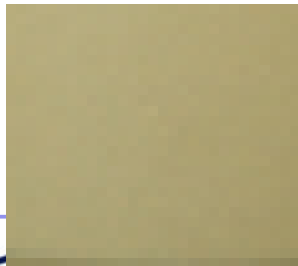
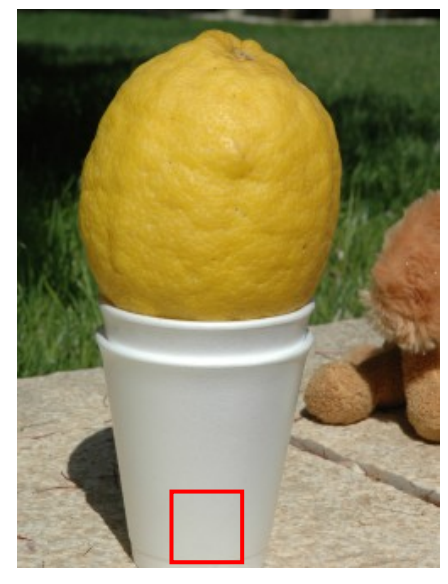
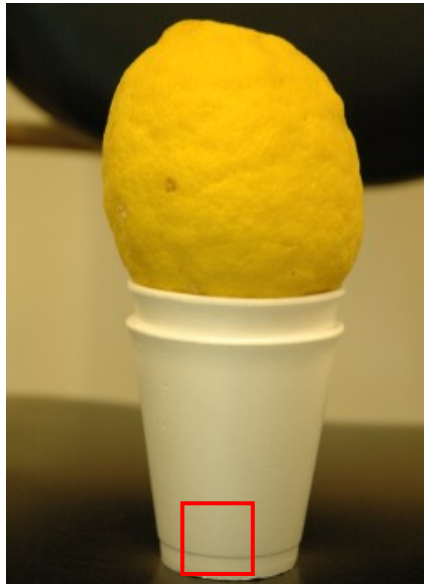
- Transformation non-bijective
 - De l'ensemble des spectres possibles S
 - Vers l'ensemble des couleurs possibles C
- Conclusion :
 - Plusieurs spectres peuvent aboutir à la même couleur
- Métamère
 - Ensemble des spectres aboutissant à la même couleur
 - Accentuée par la discrétisation de la mesure



Exemple



Couleur sous différents éclairagements



Dépendance à l'éclairage

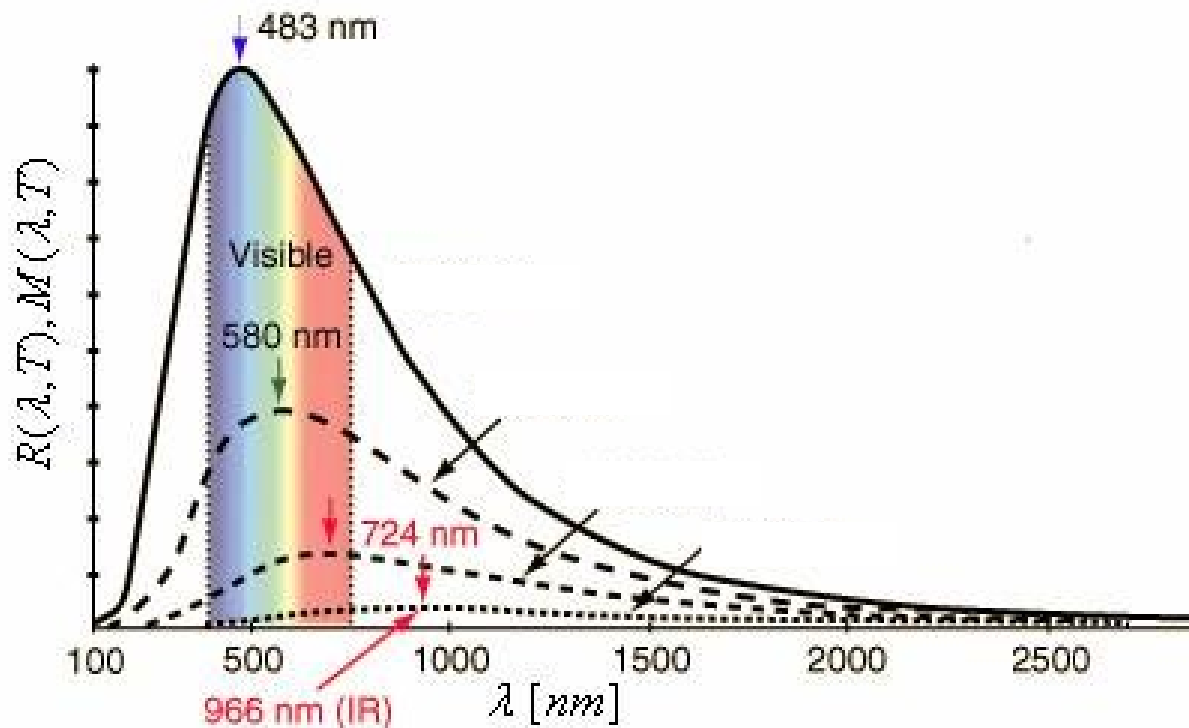
- Couleur caractéristique
 - Sous un éclairage standard (spectre uniforme)
 - Correspondrait à l'absorption en couleur
 - Point de vue objet

- Constance de la couleur (color constancy)
 - Notion perceptuelle
 - Reconnaissance d'une même couleur sous divers éclairagements
 - Principe : « simuler » le re-éclairage

Température d'une source de lumière

- Répartition spectrale d'un corps noir chauffé

– Loi de Wien $\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$



Charte de couleur Macbeth

- Processus
 - Prendre une image de la charte de couleur
 - Optimiser le système pour faire correspondre les couleurs

RGB Values for Macbeth Color Checker

One might argue this is one of the most boring pages on the whole internet. I mean really, RGB values for a bunch of squares. But when I bought my ColorChecker card, it comes with a little pamphlet giving the RGB values for the color patches, and

Patch #	Patch Color	Red	Green	Blue
1	dark skin	94	28	13
2	light skin	241	149	108
3	blue sky	97	119	171
4	foliage	90	103	39
5	blue flower	164	131	196
6	bluish green	140	253	153
7	orange	255	116	21
8	purplish blue	7	47	122
9	moderate red	222	29	42
10	purple	69	0	68
11	yellow green	187	255	19
12	orange yellow	255	142	0



Charte de couleur MacBeth (couleur)

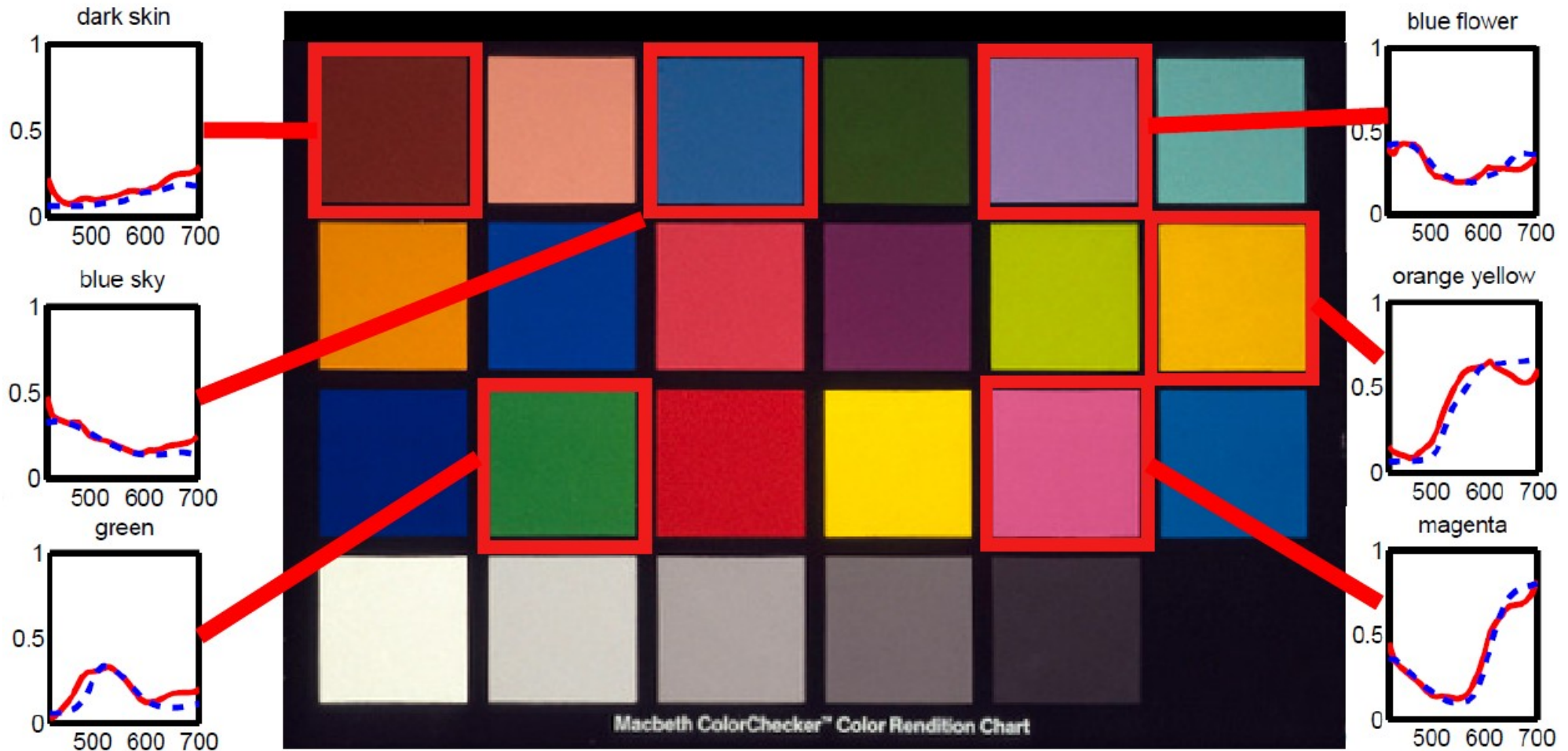
RGB Values for Macbeth Color Checker

One might argue this is one of the most boring pages on the whole internet. I mean really, RGB values for a bunch of squares. But when I bought my ColorChecker card, it comes with a little pamphlet giving the RGB values for the color patches, and

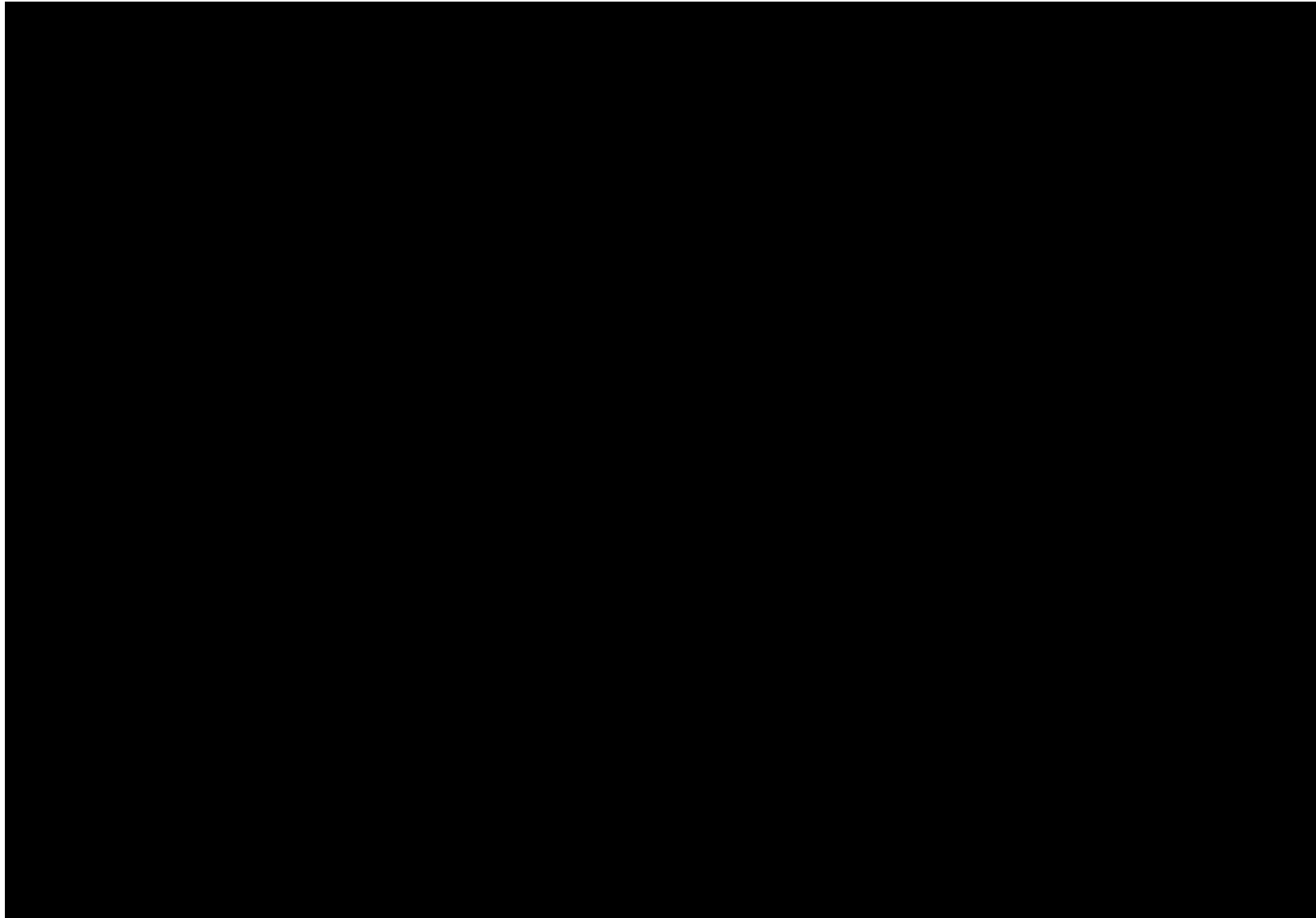
Patch #	Patch Color	Red	Green	Blue
1	dark skin	94	28	13
2	light skin	241	149	108
3	blue sky	97	119	171
4	foliage	90	103	39
5	blue flower	164	131	196
6	bhish green	140	253	153
7	orange	255	116	21
8	purplish blue	7	47	122
9	moderate red	222	29	42
10	purple	69	0	68
11	yellow green	187	255	19
12	orange yellow	255	142	0



Charte de couleur MacBeth (Spectre)



Charte de couleur MacBeth

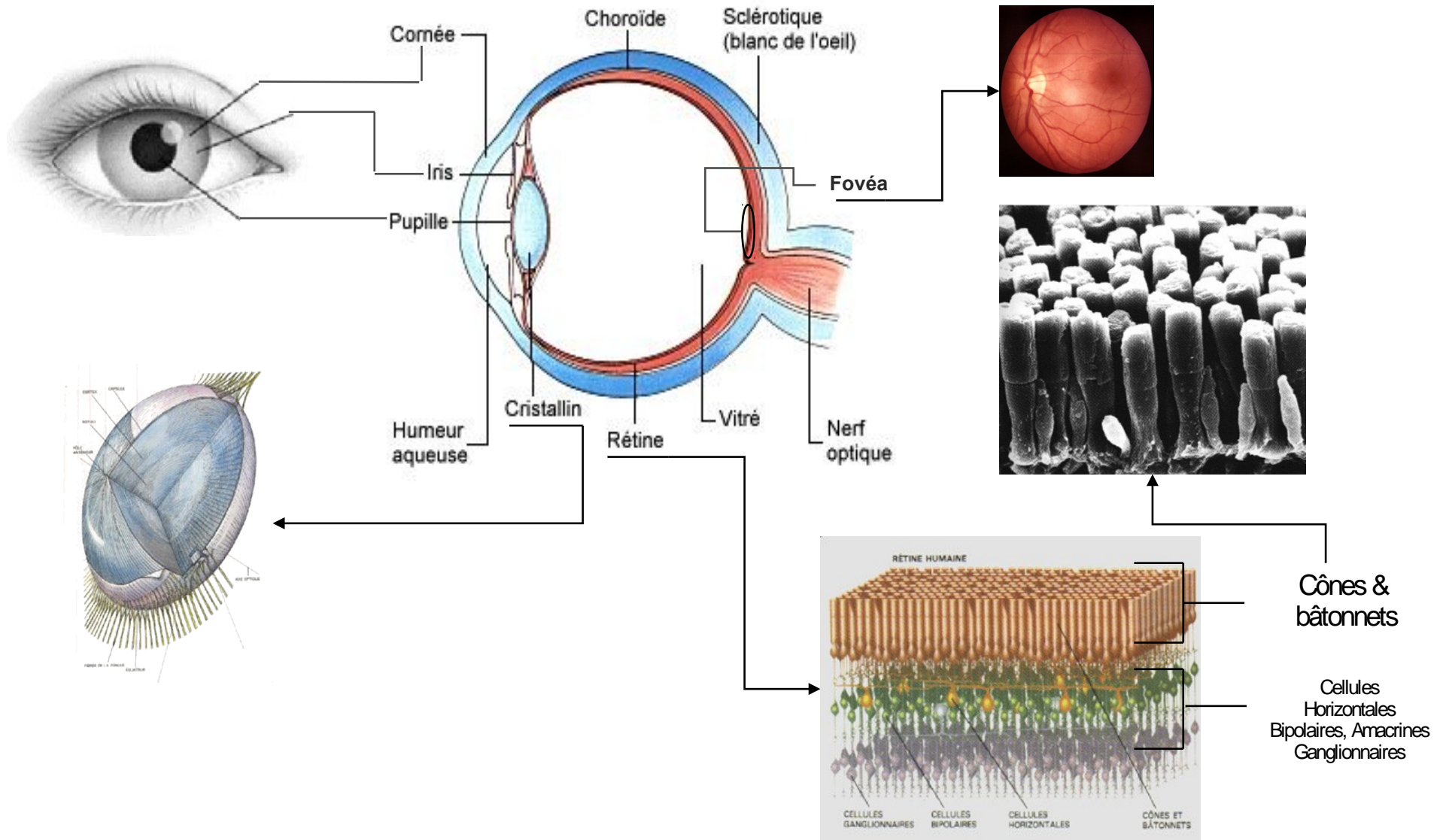


Capteur de référence : l'œil

- Système optique complet
 - Des lentilles (cornée, cristallin, ...)
 - Un diaphragme (pupille)
 - Un capteur (rétine)
 - Un système de traitement

- Capteur
 - Cônes : segmentation des couleurs
 - Bâtonnets : luminance

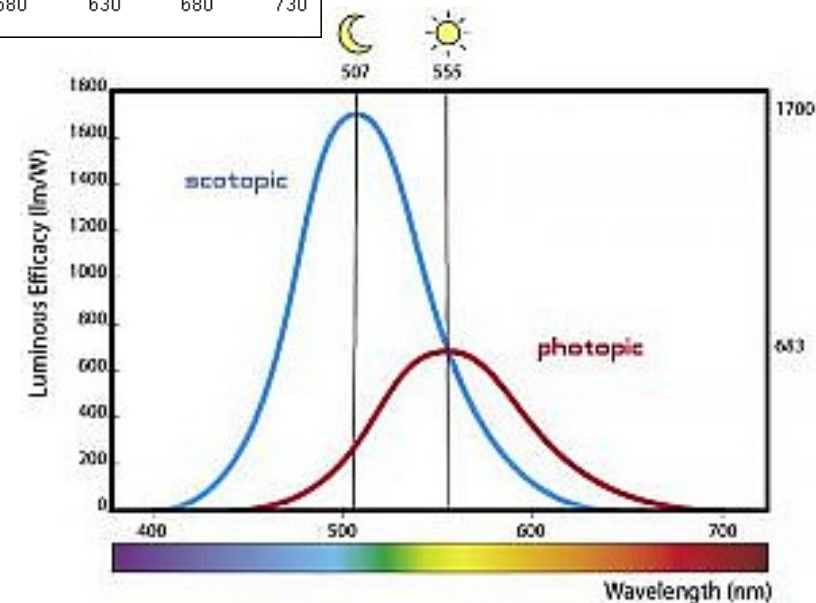
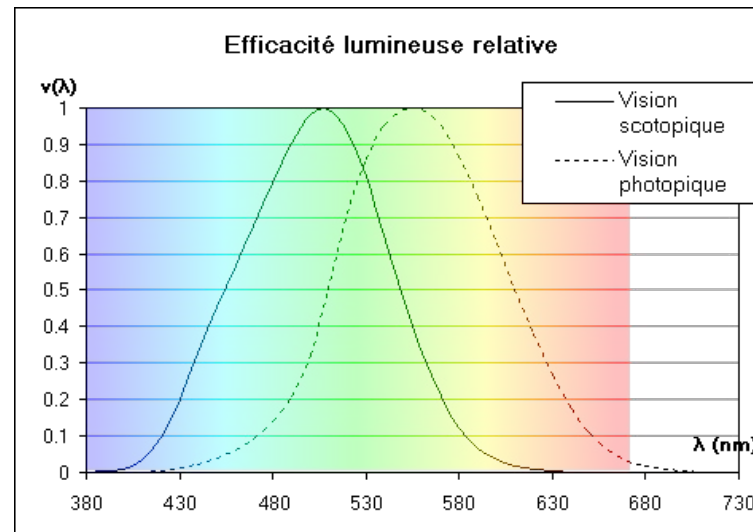
Le photo-récepteur



De la cornée à la rétine (exclue) la courbe de transmission spectrale couvre une gamme de 300 nm à 1400 nm. Le cristallin porte la limite inférieure globale à 380 nm au lieu de 300 nm

Luminosité : bâtonnets

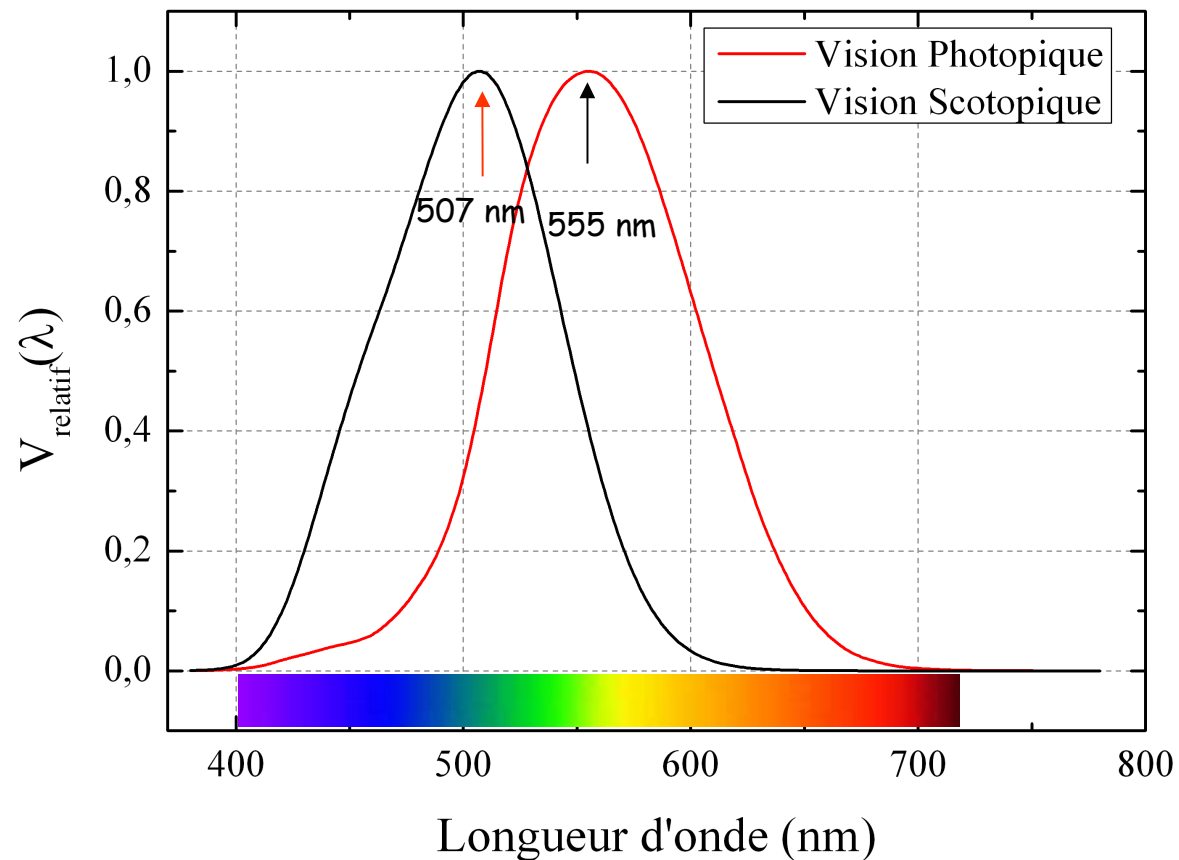
- Très nombreux
 - ~ 120 millions
- Très sensible
 - Photon
- Lent à l'adaptation
- Spectre visible
 - ~ 380 nm à ~ 780 nm
- Vision **photopique**
 - De jour
 - Maximum à ~ 550 nm
- Vision **scotopique**
 - De nuit
 - Maximum à ~ 500 nm



efficacité énergétique $V(\lambda)$

Régimes de fonctionnement

- Vision de jour (uniquement cônes) : vision **Photopique**
- Vision de nuit (uniquement bâtonnet) : vision **Scotopique**



Valeur standard (CIE) de l'efficacité lumineuse relative $V_{\text{relatif}}(\lambda)$

Vision photopique : courbe normalisé

λ (nm)		λ (nm)		λ (nm)		λ (nm)		λ (nm)	
		400	0,000 4	500	0,323	600	0,631	700	0,004 1
		410	0,001 2	510	0,503	610	0,503	710	0,002 1
		420	0,004 0	520	0,710	620	0,381	720	0,001 05
		430	0,011 6	530	0,862	630	0,265	730	0,000 52
		440	0,023	540	0,954	640	0,175	740	0,000 25
		450	0,038	550	0,995	650	0,107	750	0,000 12
		460	0,060	560	0,995	660	0,061	760	0,000 06
		470	0,091	570	0,952	670	0,032	770	0,000 03
380	0,000 0	480	0,139	580	0,870	680	0,017	780	0,000 015
390	0,000 1	490	0,208	590	0,757	690	0,0082		

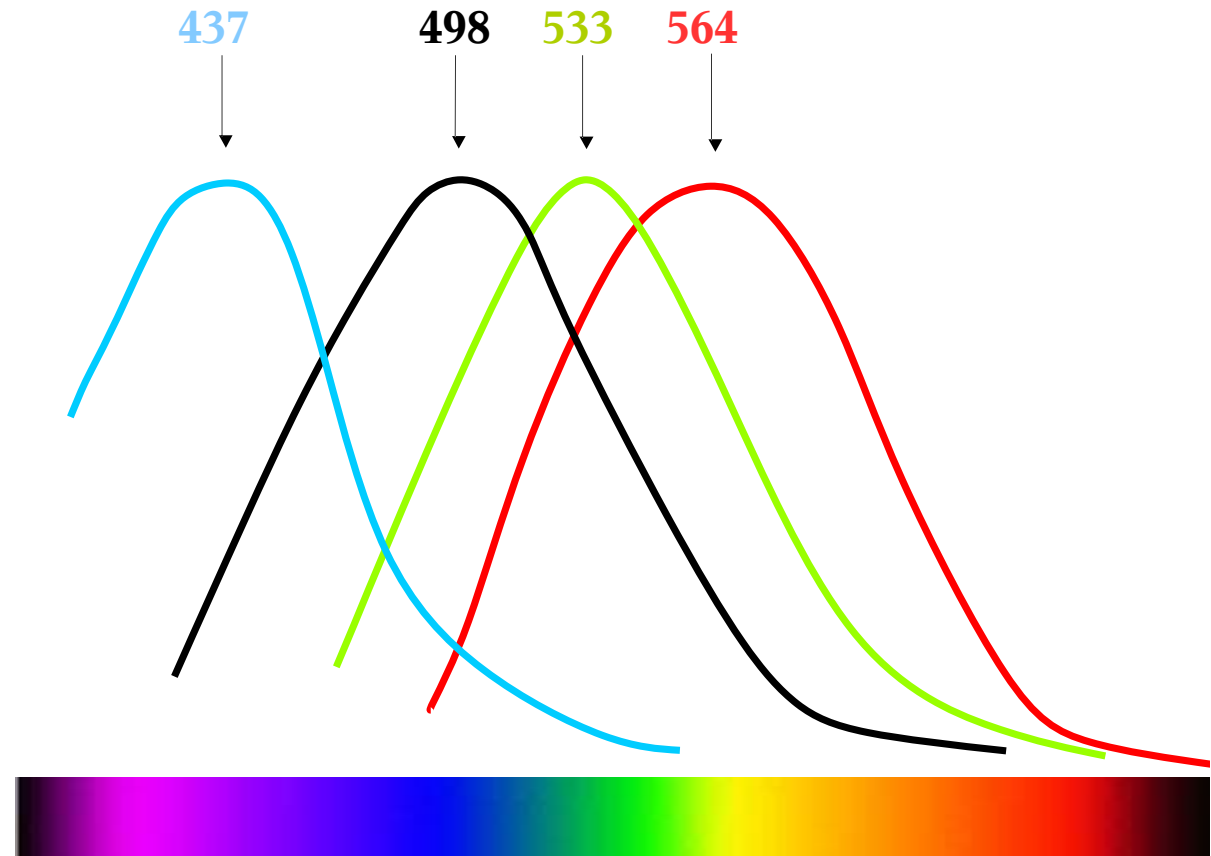
Maximum à 555 nm = 683 lm.W⁻¹

Luminance

- Lumen (lm)
 - Source qui émet un flux de 1 W à 555 nm
 - 683 lm
- 555 correspond au
 - maximum de la courbe d'efficacité énergétique
 - vision diurne
- Donnée plus perceptuel

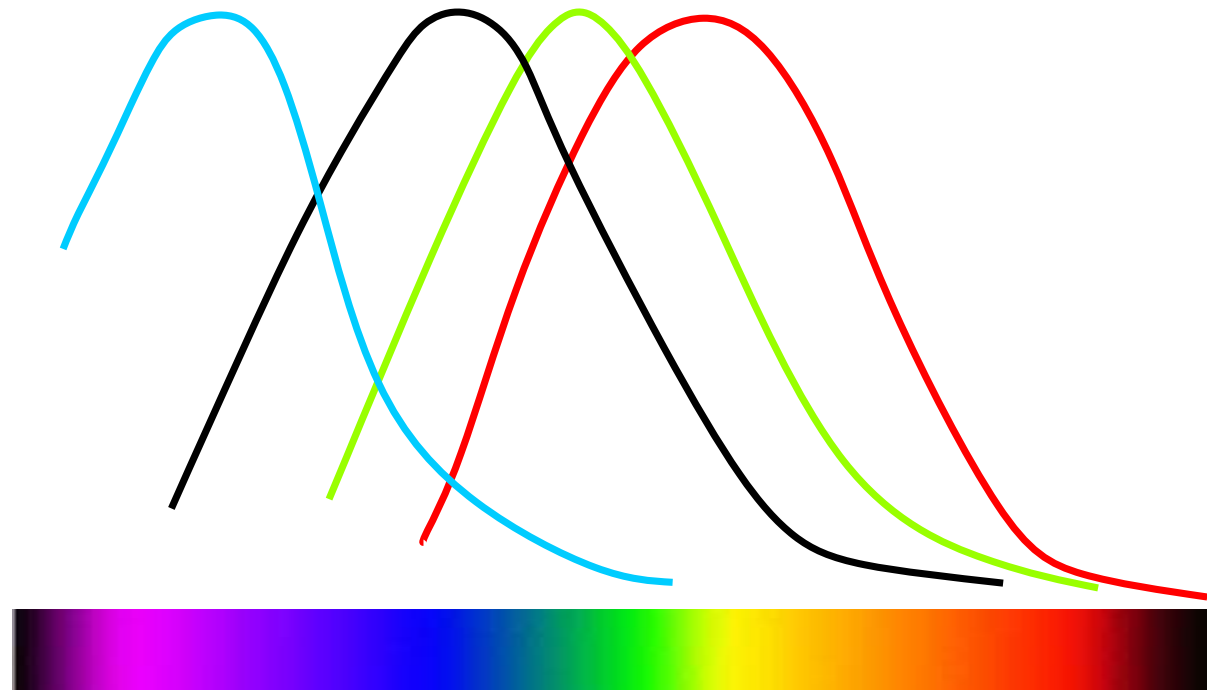
Chromaticité : les cônes

- Petit nombre
 - ~ 5/7 millions
- Sensibilité moyenne
 - ~ 100 x plus faible
- Réponse très rapide
 - ~ 4 fois plus rapide
 - ~ 100 ms
- Vision photopique
- 3 courbes de réponses
 - Humain et singes
 - Trichromate



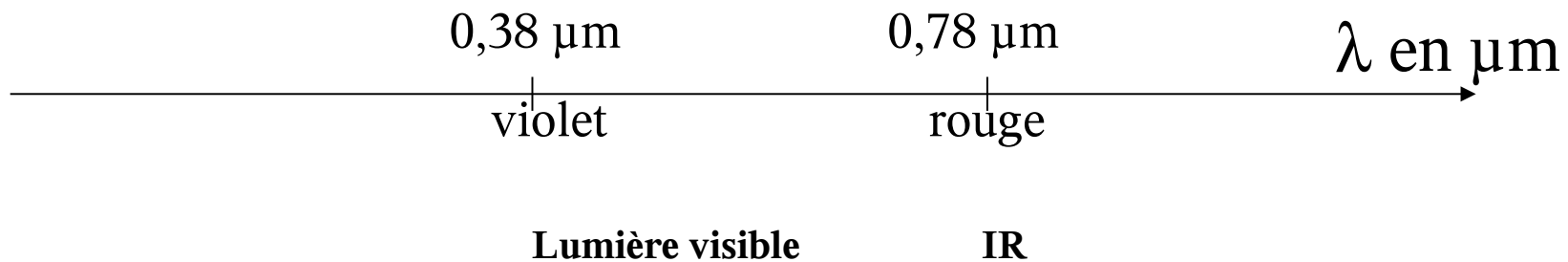
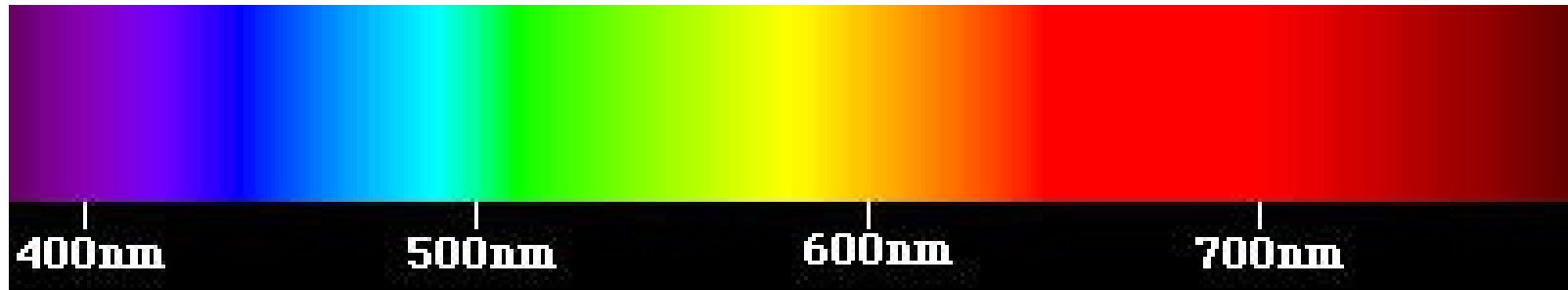
Anomalies de la vision colorée

- **Achromatie**
 - Vision noir et blanc
 - Très rare
- **Dichromatie**
 - Protanope : vert & bleu
 - Daltonien
 - Tritanope : rouge & bleu
 - Deuteranope : rouge & vert
- Quadrichromie / pentachromie
- Vert & rouge :
 - chromosome X
- Bleu :
 - chromosome 7



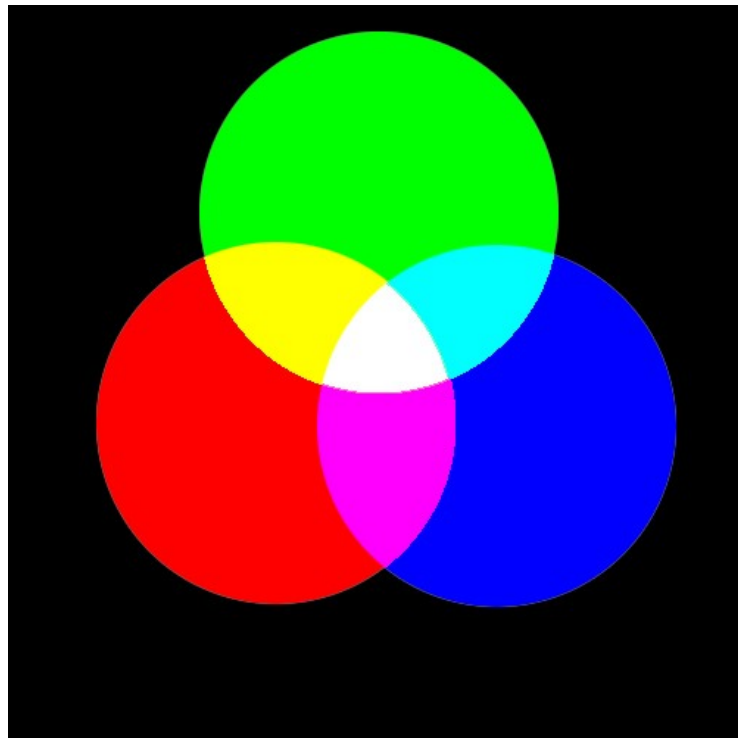
Conclusion : domaine du visible

$$380 \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$$

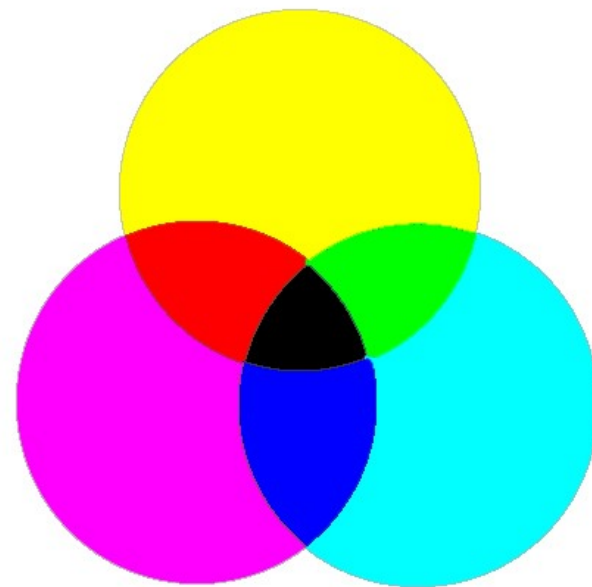


Systemes de couleur en trichromie

ADDITIVE

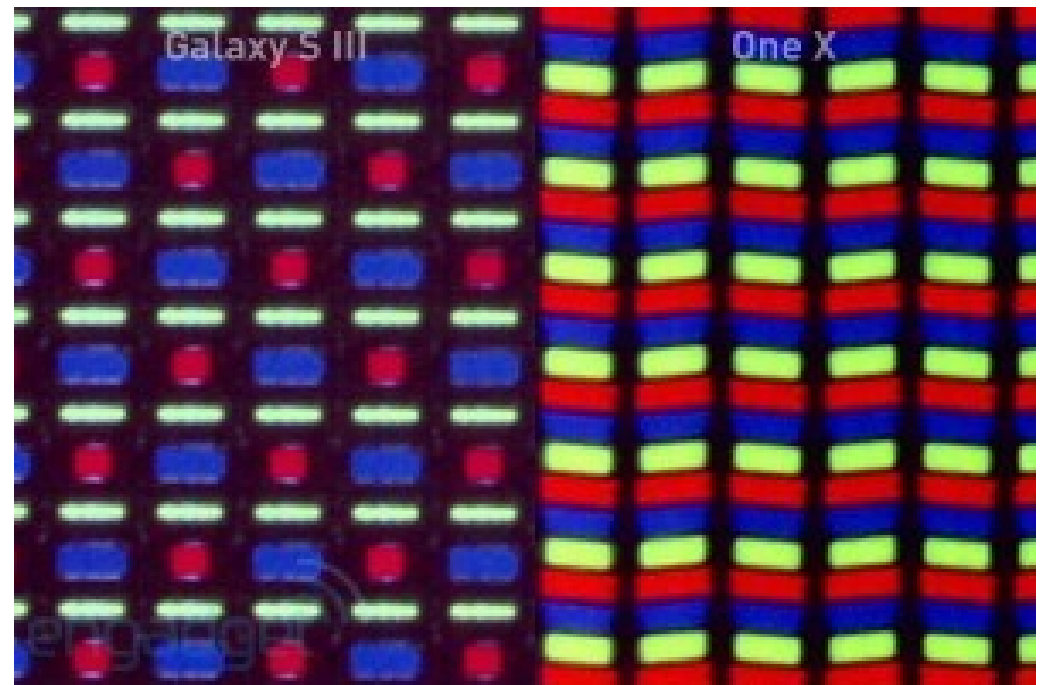
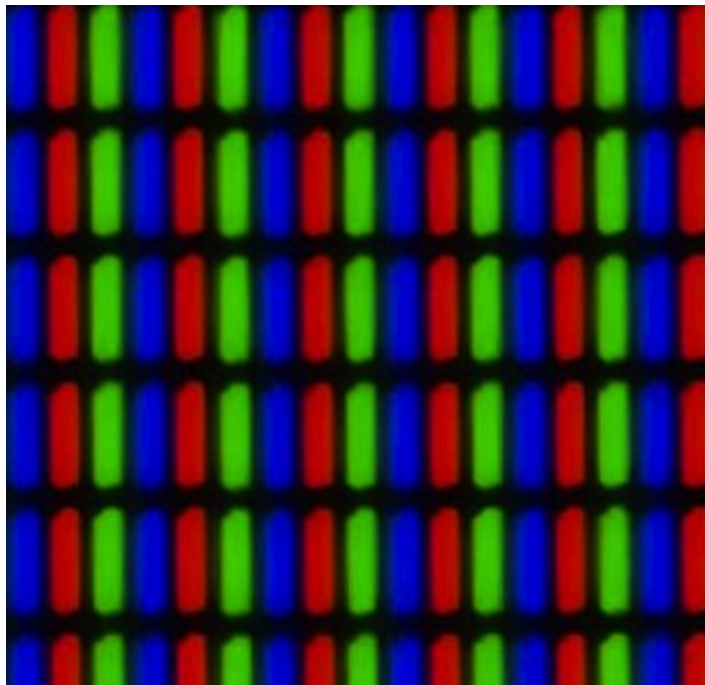


SOUSTRACTIVE

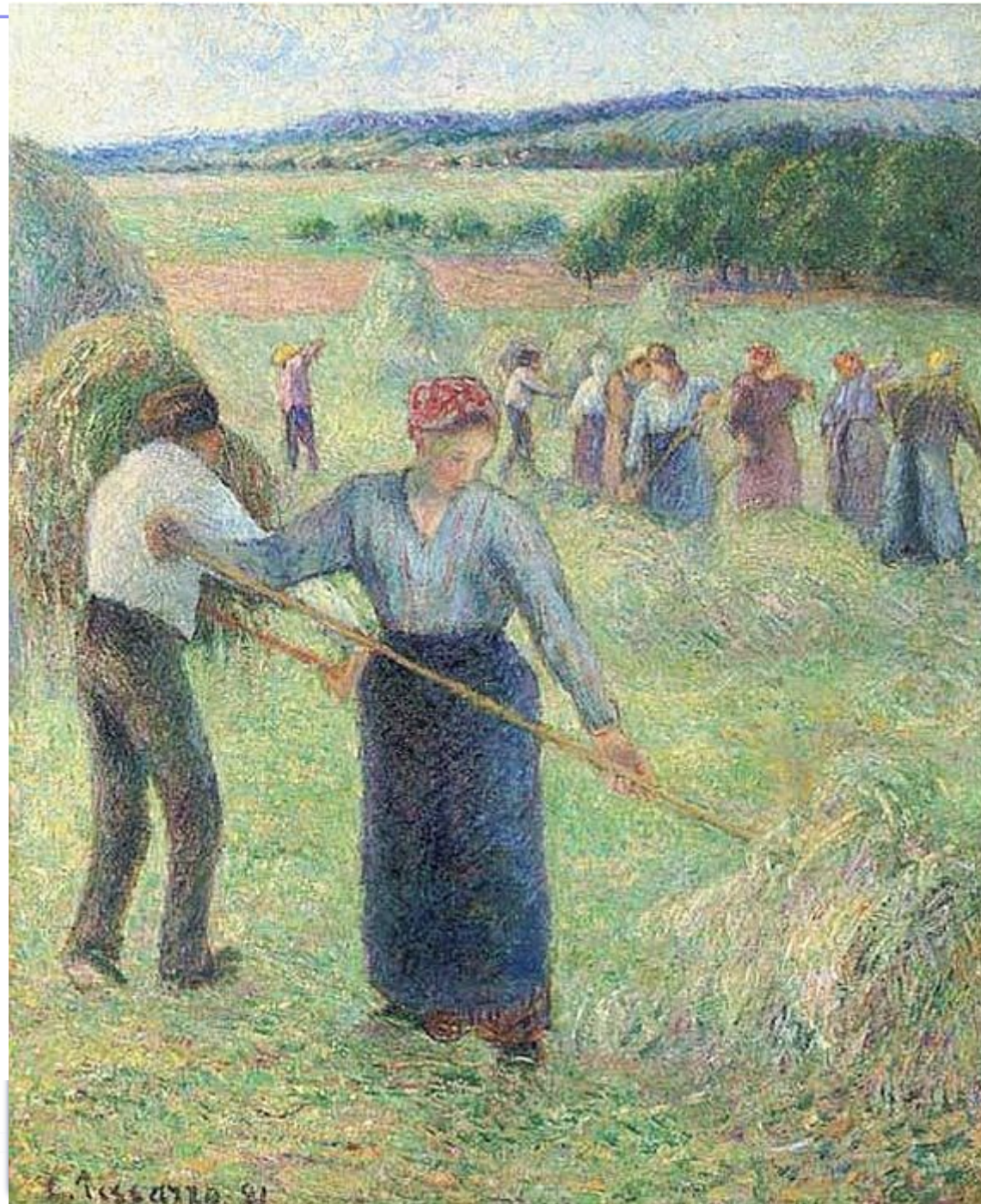


Les espaces de couleur additifs

- Comment réaliser un système additif ?
 - Juxtaposition
 - Résolution inférieure à celle de l'oeil



Les espaces de couleur additifs



Pointillisme

Fenaison à Eragny - Pissaro 1891

Tri-chromatique additif

➤ Principes

↳ Proches du comportement de l'œil

➤ XYZ : normalisé par la CIE (1931 - 1964)

↳ Y (Luminance), Z (Chrominance)

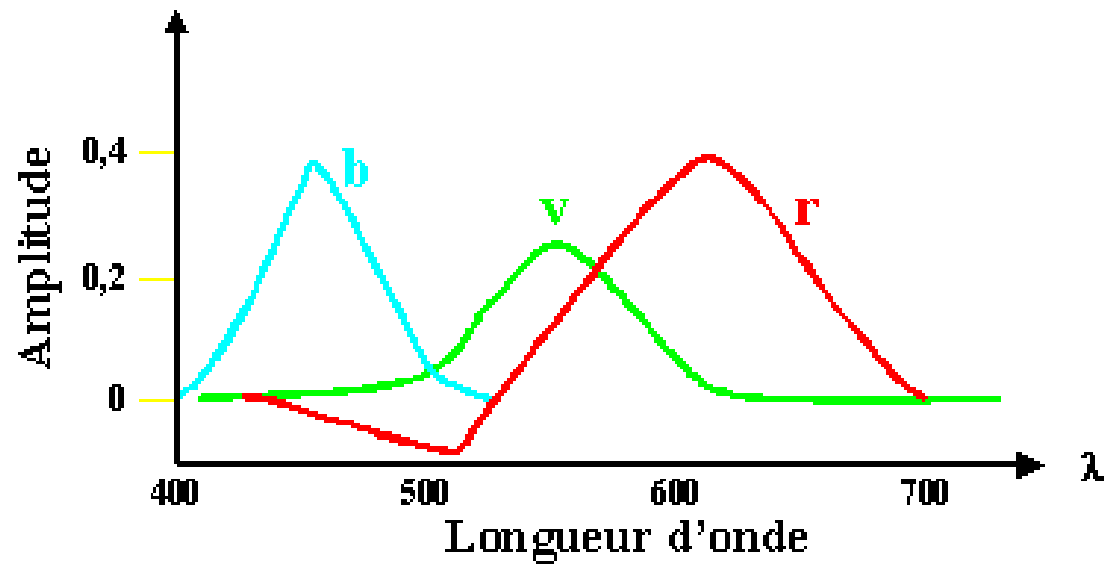
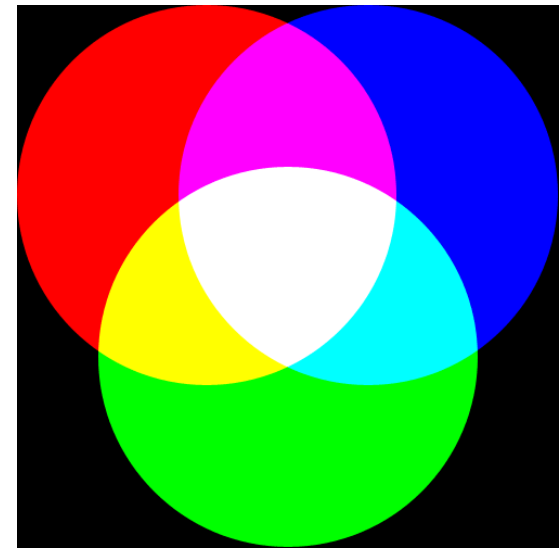
➤ Autres espaces

↳ Tous exprimables en fonction de XYZ

↳ YIQ (NTSC), YUV (PAL)

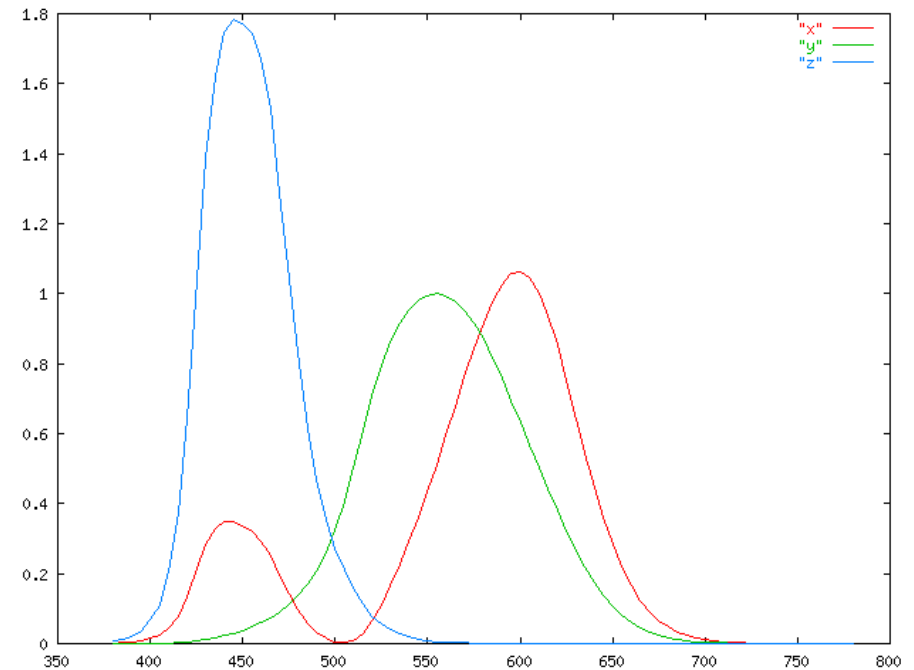
↳ RVB (RGB) : dépend des périphériques

↳ ...



XYZ CIE 1931

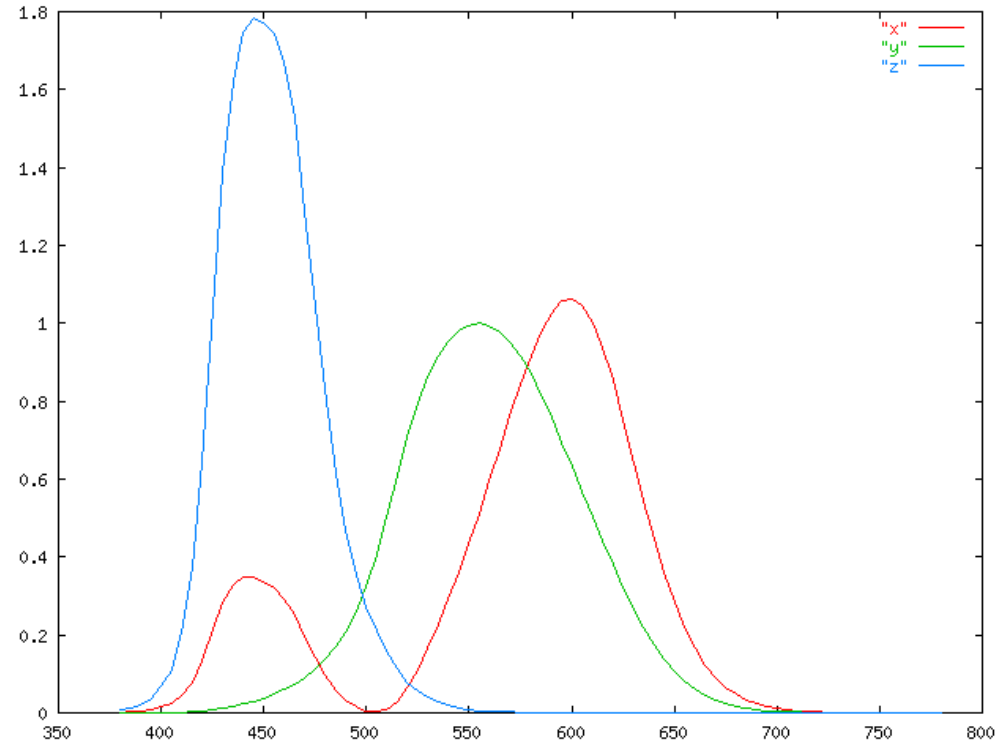
- Fonctions colorimétriques
 - Toutes les couleurs perçues
- CIE 1931 standard Observer
 - Couleur perçue à travers un cône de 2°
 - Sous une lumière standard
 - Tabulée tous les 5 nm
 - $\bar{y}(\lambda) =$ efficacité énergétique $V(\lambda)$
- Trois valeurs X Y Z
 - Y luminance
 - X Z la couleur
- Choix de k
 - Y = 100 pour un diffuseur parfait



$$\begin{cases} X = k \int_{380}^{830} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int_{380}^{830} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int_{380}^{830} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

XYZ CIE 1931

- Fonctions colorimétriques
 - Toutes les couleurs perçues
- CIE 1931 standard Observer
 - Couleur perçue à travers un cône de 2°
 - Sous une lumière standard
 - Tabulée tous les 5 nm
 - $\bar{y}(\lambda) = \text{efficacité énergétique } V(\lambda)$
- Trois valeurs X Y Z
 - Y luminance
 - X Z la couleur
- Choix de k
 - Y = 100 pour un diffuseur parfait



$$\begin{cases} X = k \sum_i S_i \bar{x}_i \Delta \lambda \\ Y = k \sum_i S_i \bar{y}_i \Delta \lambda \\ Z = k \sum_i S_i \bar{z}_i \Delta \lambda \end{cases}$$

Coordonnées de chromaticité

- Définition de couleur indépendante de la luminance

- Idée normaliser $X Y Z$

- $z = 1 - x - y$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \end{array} \right.$$

- Couleur

- Coordonnée xy

- Luminance Y

Diagramme de chromaticité

- Luminance constante
- Ensemble des couleurs visibles

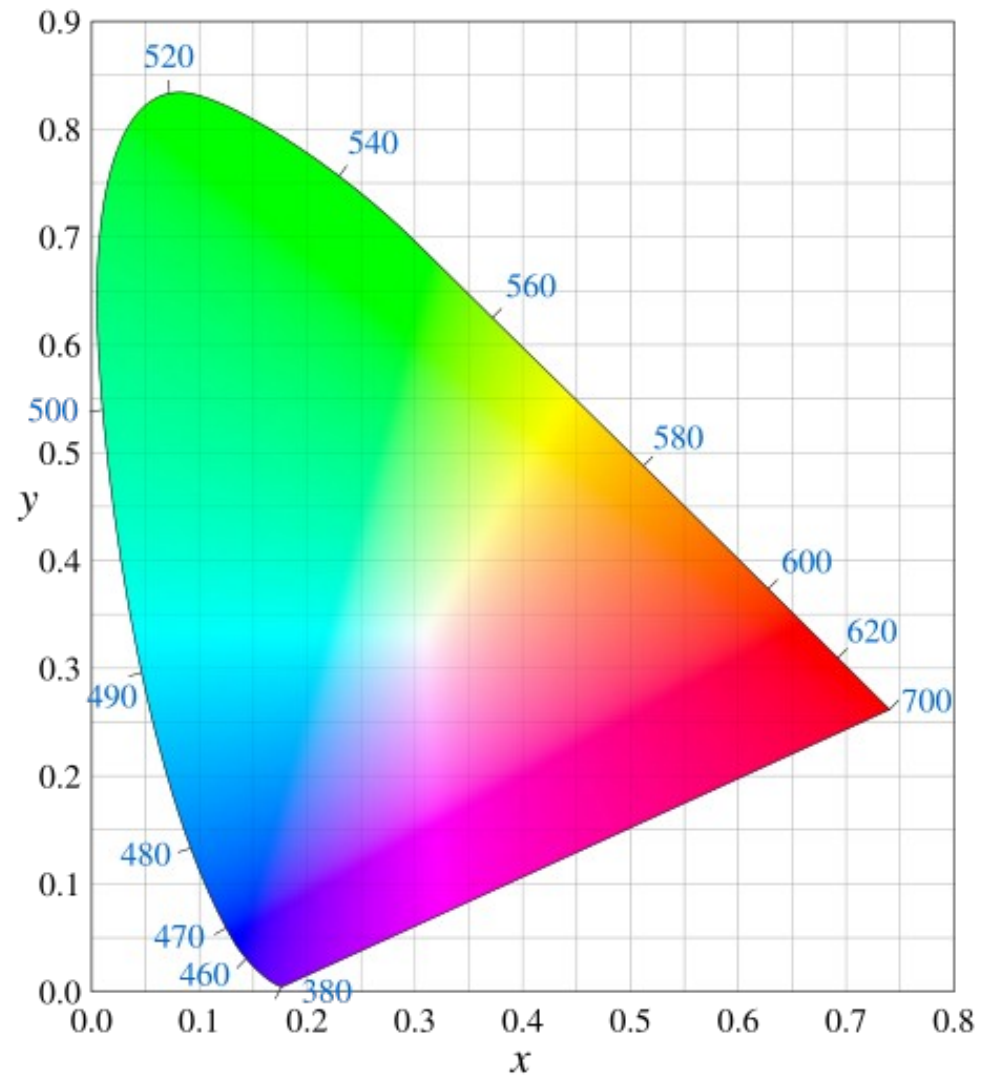
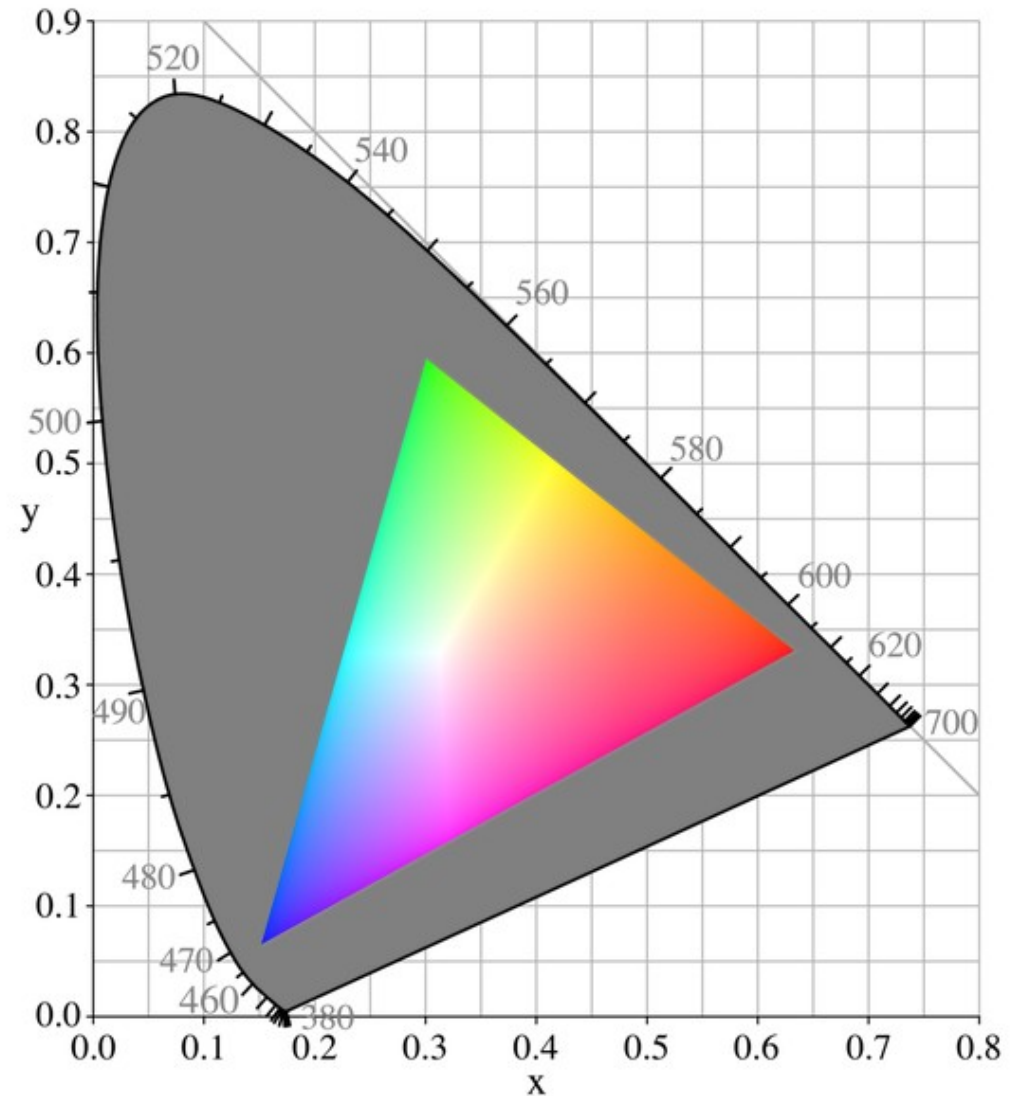


Diagramme de chromaticité

- Luminance constante
- Ensemble des couleurs visibles
- Gamut
 - Sous espace de ces couleurs
 - sRGB à gauche (écran standard)



RGB (RVB) CIE 1931

- Ensemble des espaces RGB
 - Rouge de référence (x_R, y_R, z_R)
 - Vert de référence (x_G, y_G, z_G)
 - Bleu de référence (x_B, y_B, z_B)
 - Blanc de référence (X_W, Y_W, Z_W)

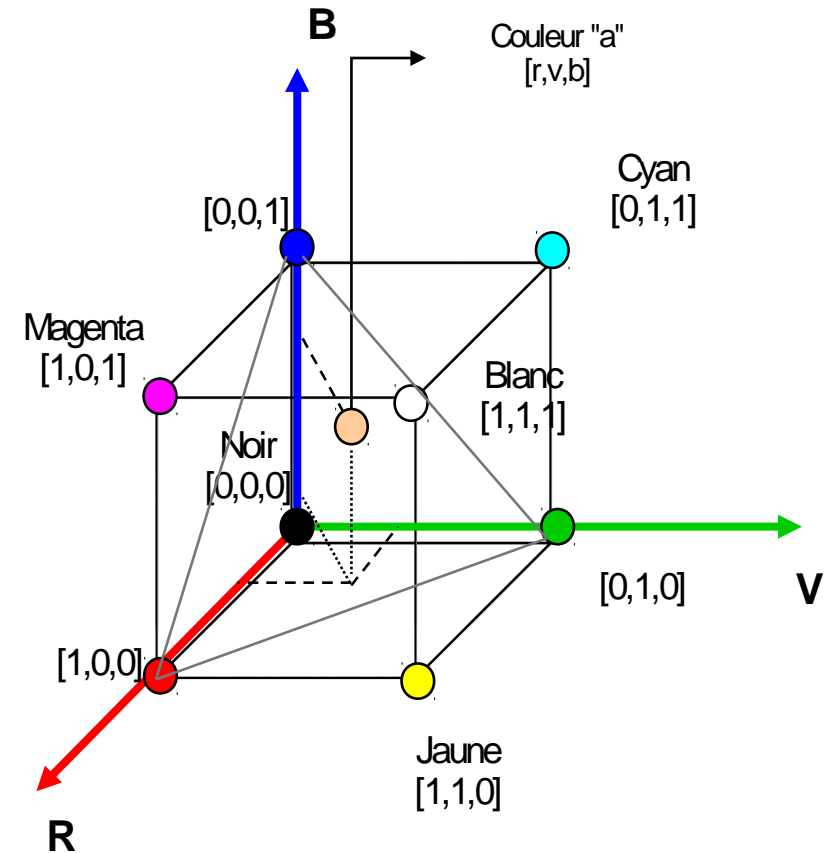
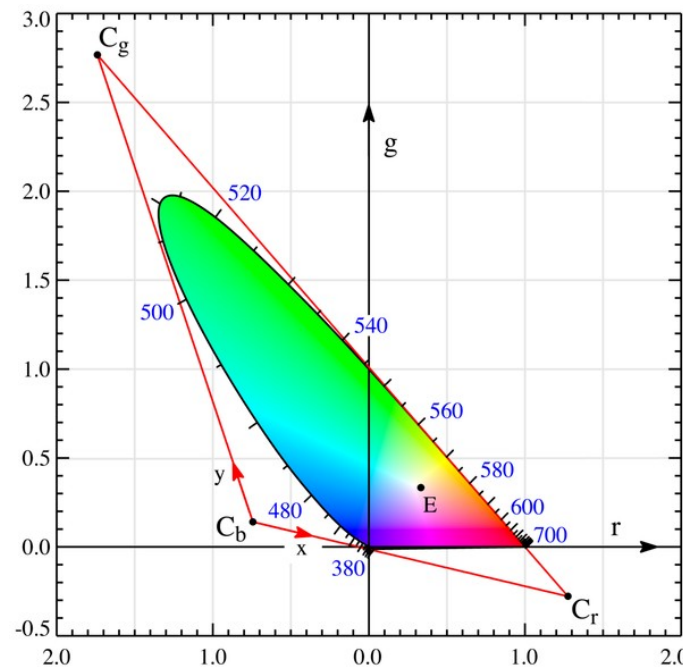
$$\begin{cases} X_W = x_R S_R + x_G S_G + x_B S_B \\ Y_W = y_R S_R + y_G S_G + y_B S_B \\ Z_W = z_R S_R + z_G S_G + z_B S_B \end{cases}$$

- Transformation matricielle
 - (S_R, S_G, S_B) solution d'un système
 - Matrice de transformation

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R S_R & x_G S_G & x_B S_B \\ y_R S_R & y_G S_G & y_B S_B \\ z_R S_R & z_G S_G & z_B S_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

L'espace RGB

- Vecteur à 3 dimension
- Chaque dimension
 - Minimum 0
 - Maximum 1



ITU- R Recommendation BT.709

	R	G	B	White
x	0.6400	0.3000	0.1500	0.3127
y	0.3300	0.6000	0.0600	0.3290

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.32405 & -1.5371 & -0.4985 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0572 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$L = Y = 0.2126 R + 0.7152 G + 0.0722 B$$

Pour un écran calibré (Barco)

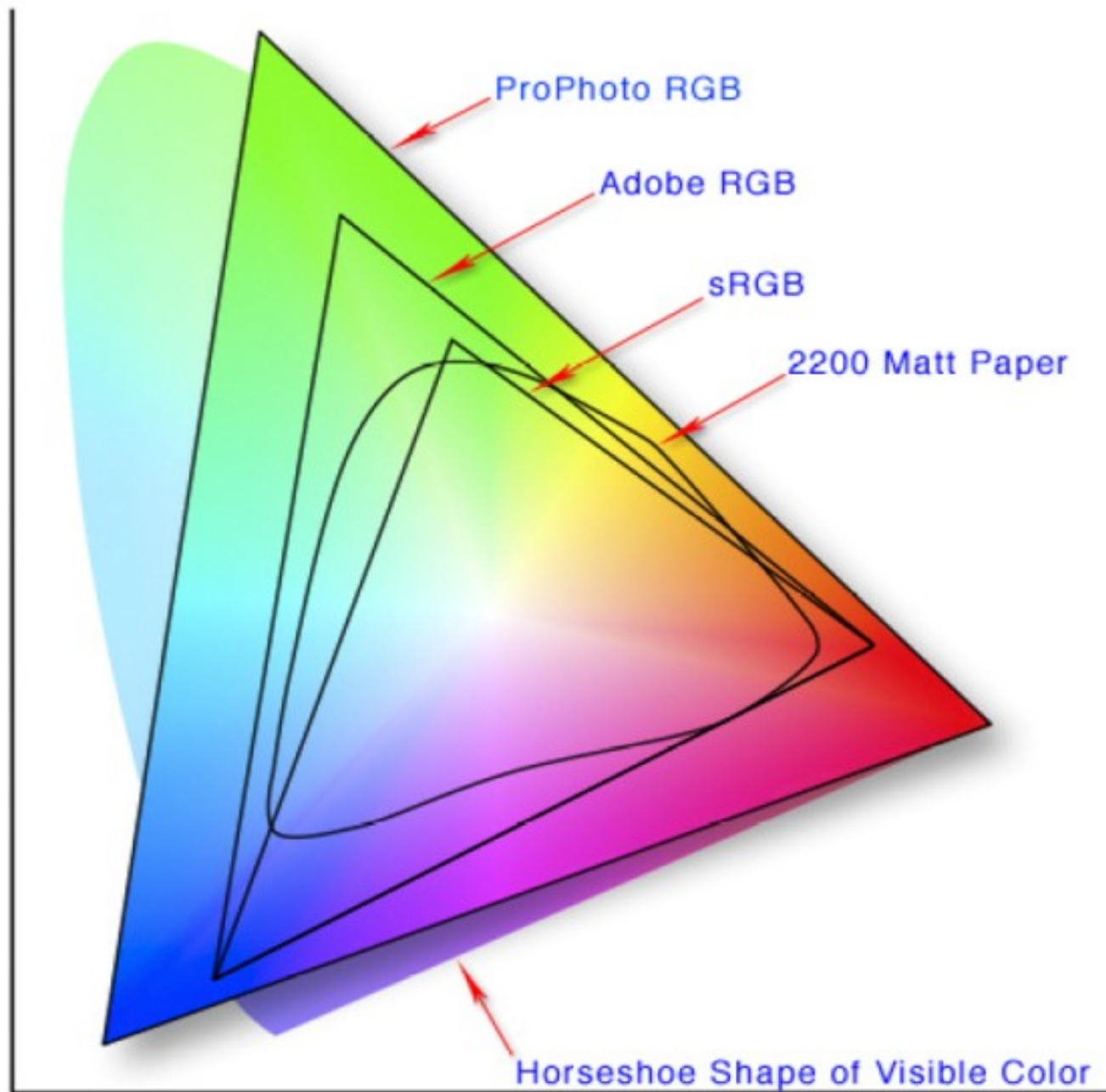
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.430 & 0.342 & 0.178 \\ 0.222 & 0.707 & 0.071 \\ 0.020 & 0.130 & 0.939 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ V \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R \\ V \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.063 & -1.393 & 0.476 \\ -0.970 & 1.876 & 0.042 \\ 0.068 & -0.229 & 1.069 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Color Space		Primaries			White point (illuminant)	
		R	G	B		
Adobe RGB (1998)	x	0.6400	0.2100	0.1500	D65	0.3127
	y	0.3300	0.7100	0.0600		0.3290
sRGB	x	0.6400	0.3000	0.2100	D65	0.3127
	y	0.3300	0.6000	0.7100		0.3290
HDTV (HD-CIF)	x	0.6400	0.3000	0.2100	D65	0.3127
	y	0.3300	0.6000	0.7100		0.3290
NTSC (1953)	x	0.6700	0.2100	0.1400	C	0.3101
	y	0.3300	0.7100	0.0600		0.3161
SMPTE-C	x	0.6300	0.3100	0.1550	D65	0.3127
	y	0.3400	0.5950	0.0700		0.3290
PAL/SECAM	x	0.6400	0.2900	0.2100	D65	0.3127
	y	0.3300	0.6000	0.7100		0.3290
Wide Gammut	x	0.7347	0.1152	0.1566	D50	0.3457
	y	0.2653	0.8264	0.0177		0.3584

Scene	T (in K)	x	y
Candle flame	1850	0.543	0.410
Sunrise/sunset	2000	0.527	0.413
Tungsten TV/Film	3200	0.427	0.398
Summer sunlight at noon	5400	0.326	0.343
CIE A (incandescent)	2854	0.448	0.408
CIE B (direct sunlight)	4874	0.384	0.352
CIE C (indirect sunlight)	6774	0.310	0.316
CIE D50 (noon skylight)	5000	0.346	0.359
CIE D65 (average daylight)	6504	0.313	0.329
CIE E (normalized reference)	5500	0.333	0.333
CIE F2 (office fluorescence)	4150	0.372	0.375

CIE XYZ vs RGB

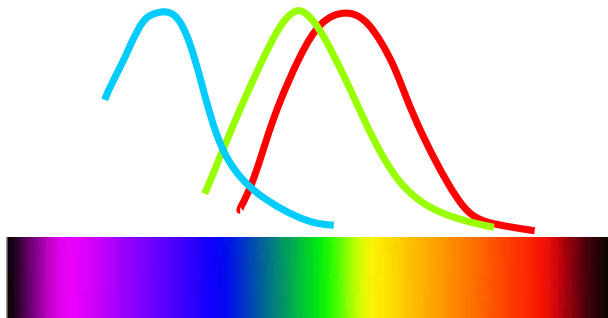


LMS

- Approcher les courbes de réponse de l'oeil
 - Long (rouge)
 - Medium (vert)
 - Short (Bleu)
- iCAM model

$$M_{\text{von Kries}} = \begin{bmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$M_{\text{von Kries}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.9102 & -1.1121 & 0.2019 \\ 0.3710 & 0.6291 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$



CIECAMO2 – modèle d'apparence de couleur

- Pour faire un équilibre des blancs

– Transformer en RGB « fin »

$$M_{\text{CAT02}} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix}$$

$$M_{\text{CAT02}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0961 & -0.2789 & 0.1827 \\ 0.4544 & 0.4735 & 0.0721 \\ -0.0096 & -0.0057 & 1.0153 \end{bmatrix}$$

– Mise à l'échelle par une matrice diagonale D

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = M_{\text{CAT02}}^{-1} D M_{\text{CAT02}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

CIECAMO2 – modèle d'apparence de couleur

- Comment calculer D

- Spécifier le point blanc initial (I)
- Spécifier le point blanc initial (F)

$$\begin{bmatrix} \rho_I \\ \gamma_I \\ \beta_I \end{bmatrix} = M_{\text{CAT02}} \begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \rho_F \\ \gamma_F \\ \beta_F \end{bmatrix} = M_{\text{CAT02}} \begin{bmatrix} X_F \\ Y_F \\ Z_F \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\rho_F}{\rho_I} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_F}{\gamma_I} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\beta_F}{\beta_I} \end{bmatrix}$$

Généralisation des espaces RGB

- Réponses non-linéaires
 - sRGB par exemple

$$R' = \begin{cases} (1+f)R^{\gamma} - f & \text{for } t \leq R \leq 1 \\ sR & \text{for } 0 \leq R < t \end{cases}$$

$$G' = \begin{cases} (1+f)G^{\gamma} - f & \text{for } t \leq G \leq 1 \\ sG & \text{for } 0 \leq G < t \end{cases}$$

$$B' = \begin{cases} (1+f)B^{\gamma} - f & \text{for } t \leq B \leq 1 \\ sB & \text{for } 0 \leq B < t \end{cases}$$

Color Space	XYZ to RGB Matrix	RGB to XYZ Matrix	Nonlinear Transform
Adobe RGB (1998)	$\begin{bmatrix} 2.0414 & -0.5649 & -0.3447 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0134 & -0.1184 & 1.0154 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5767 & 0.1856 & 0.1882 \\ 0.2974 & 0.6273 & 0.0753 \\ 0.0270 & 0.0707 & 0.9911 \end{bmatrix}$	$\gamma = \text{NA}$ $f = \text{NA}$ $s = \text{NA}$ $t = \text{NA}$
sRGB	$\begin{bmatrix} 3.2405 & -1.5371 & -0.4985 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0572 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix}$	$\gamma = 0.42$ $f = 0.055$ $s = 12.92$ $t = 0.003$
HDTV (HD-CIF)	$\begin{bmatrix} 3.2405 & -1.5371 & -0.4985 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0572 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix}$	$\gamma = 0.45$ $f = 0.099$ $s = 4.5$ $t = 0.018$
NTSC (1953)	$\begin{bmatrix} 1.9100 & -0.5325 & -0.2882 \\ -0.9847 & 1.9992 & -0.0283 \\ 0.0583 & -0.1184 & 0.8976 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6069 & 0.1735 & 0.2003 \\ 0.2989 & 0.5866 & 0.1145 \\ 0.0000 & 0.0661 & 1.1162 \end{bmatrix}$	$\gamma = 0.45$ $f = 0.099$ $s = 4.5$ $t = 0.018$

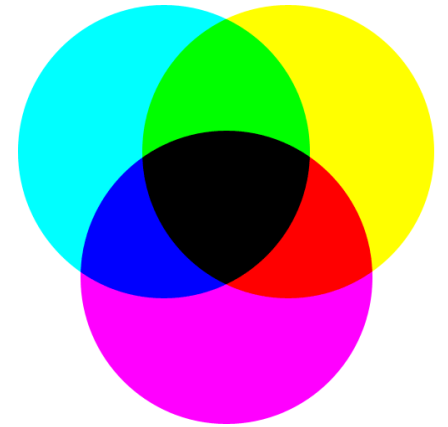
TABLE 2.9 Transformations for standard RGB color spaces (after [245]).

Color Space	XYZ to RGB Matrix	RGB to XYZ Matrix	Nonlinear Transform
SMPTE-C	$\begin{bmatrix} 3.5054 & -1.7395 & -0.5440 \\ -1.0691 & 1.9778 & 0.0352 \\ 0.0563 & -0.1970 & 1.0502 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.3936 & 0.3652 & 0.1916 \\ 0.2124 & 0.7010 & 0.0865 \\ 0.0187 & 0.1119 & 0.9582 \end{bmatrix}$	$\gamma = 0.45$ $f = 0.099$ $s = 4.5$ $t = 0.018$
PAL/SECAM	$\begin{bmatrix} 3.0629 & -1.3932 & -0.4758 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0679 & -0.2289 & 1.0694 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4306 & 0.3415 & 0.1783 \\ 0.2220 & 0.7066 & 0.0713 \\ 0.0202 & 0.1296 & 0.9391 \end{bmatrix}$	$\gamma = 0.45$ $f = 0.099$ $s = 4.5$ $t = 0.018$
Wide gamut	$\begin{bmatrix} 1.4625 & -0.1845 & -0.2734 \\ -0.5228 & 1.4479 & 0.0681 \\ 0.0346 & -0.0958 & 1.2875 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.7164 & 0.1010 & 0.1468 \\ 0.2587 & 0.7247 & 0.0166 \\ 0.0000 & 0.0512 & 0.7740 \end{bmatrix}$	$\gamma = \text{NA}$ $f = \text{NA}$ $s = \text{NA}$ $t = \text{NA}$

TABLE 2.9 (continued)

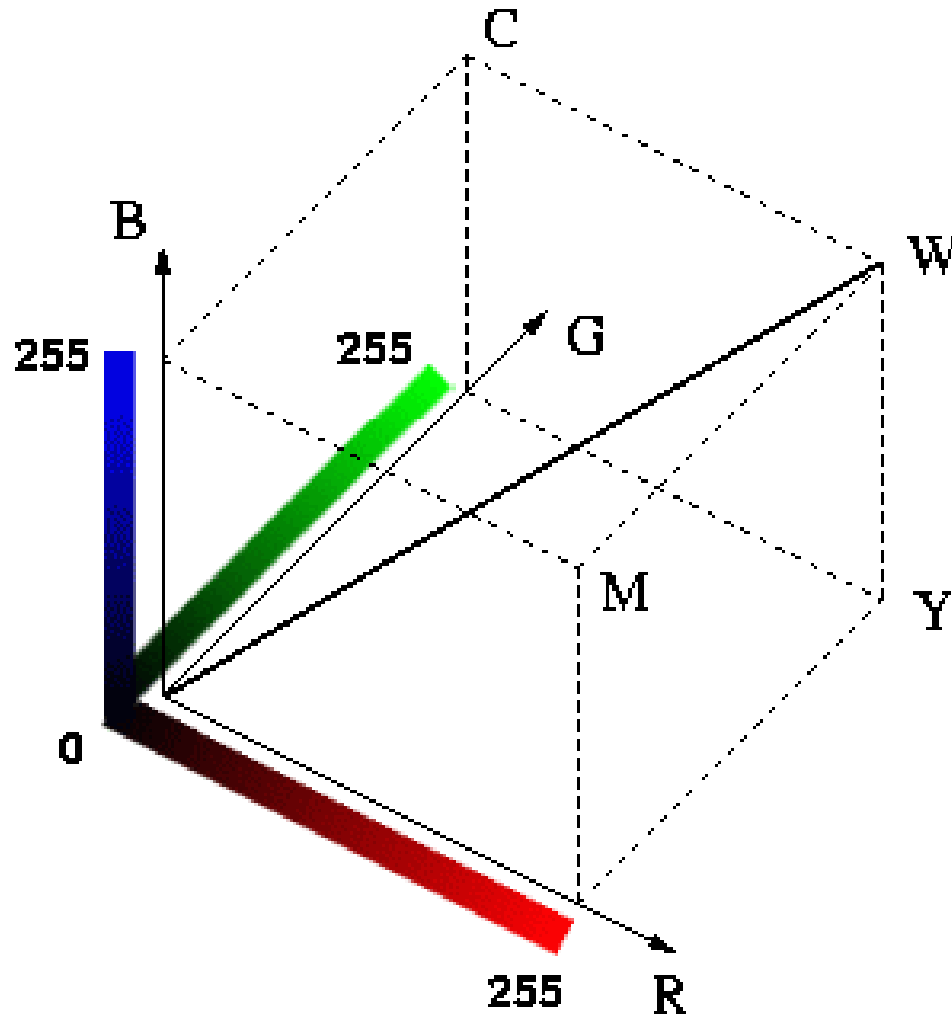
Couleur

- Système soustractif
 - Sur les imprimantes
 - CMY (Cyan – Magenta - Yellow)
 - CMYK (+ Black)



<http://www.efg2.com/Lab/Library/Color/Science.htm>

RGB et CMY



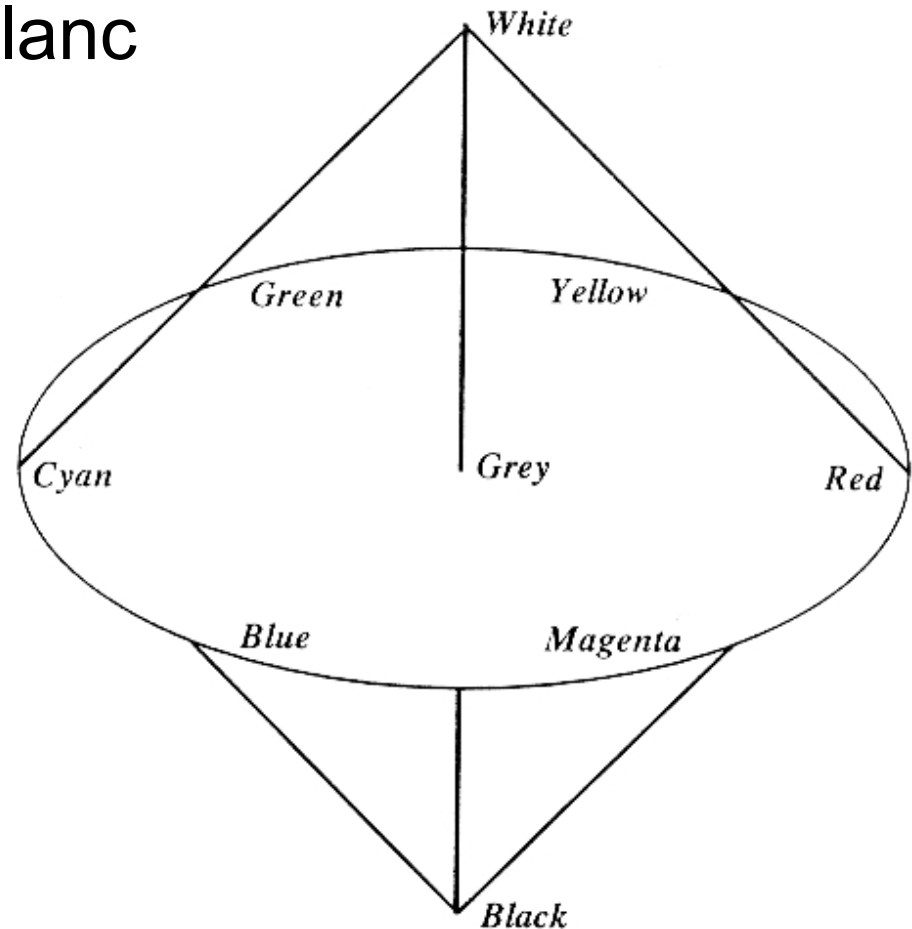
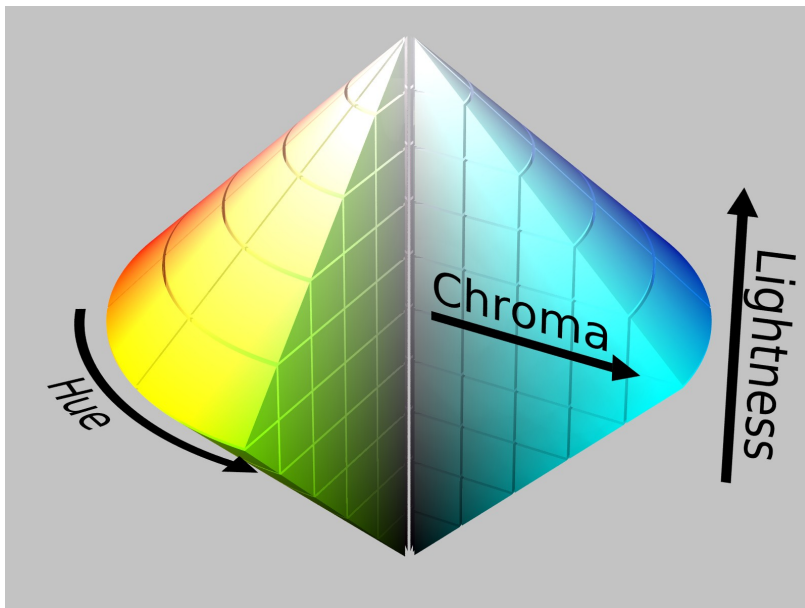
R: red
G: green
B: blue
C: cyan
M: magenta
Y: yellow
W: white

Les espaces de couleur perceptuel

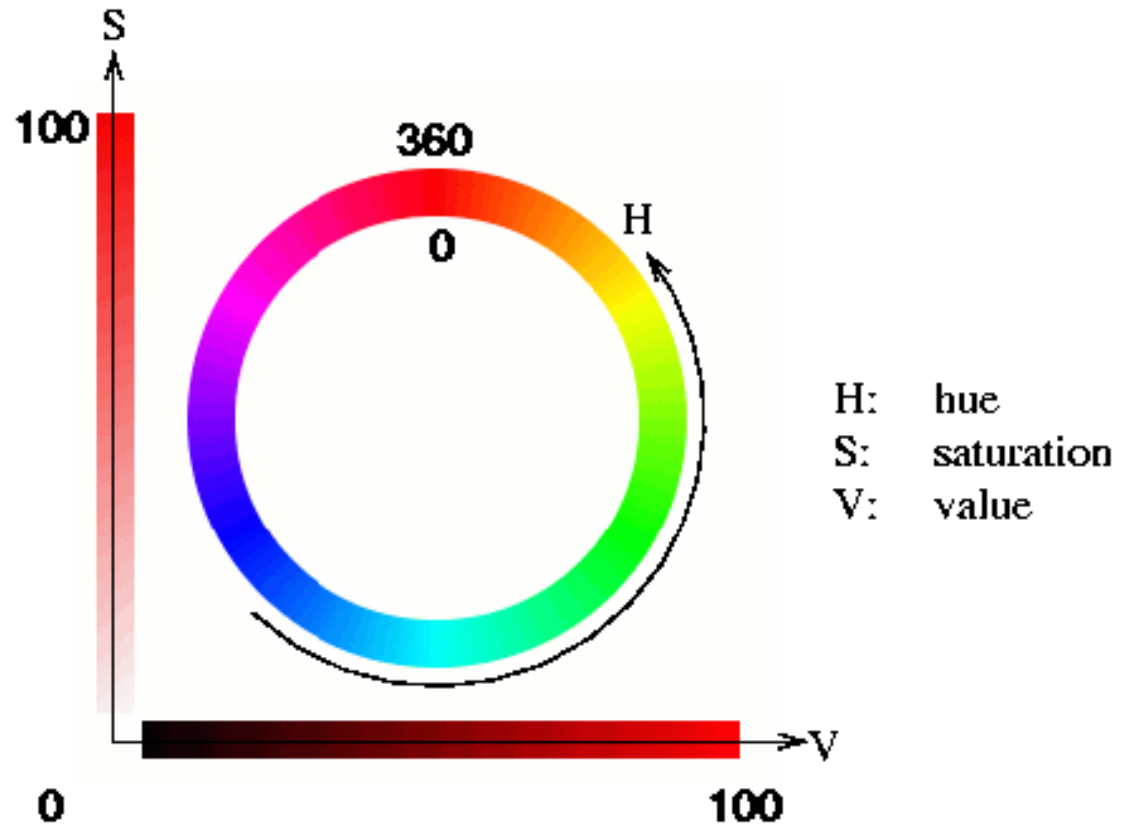
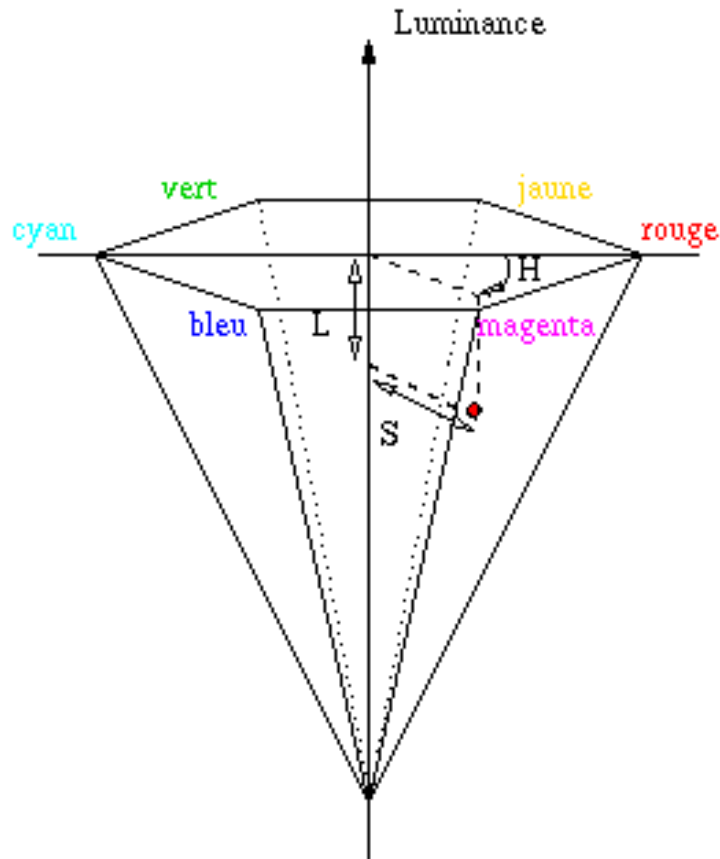
- Objectifs
 - Distance uniforme en terme de perceptions
- De nombreux espaces
 - Lab,Luv
 - HSV,

HSL : Hue, Saturation, Lightness

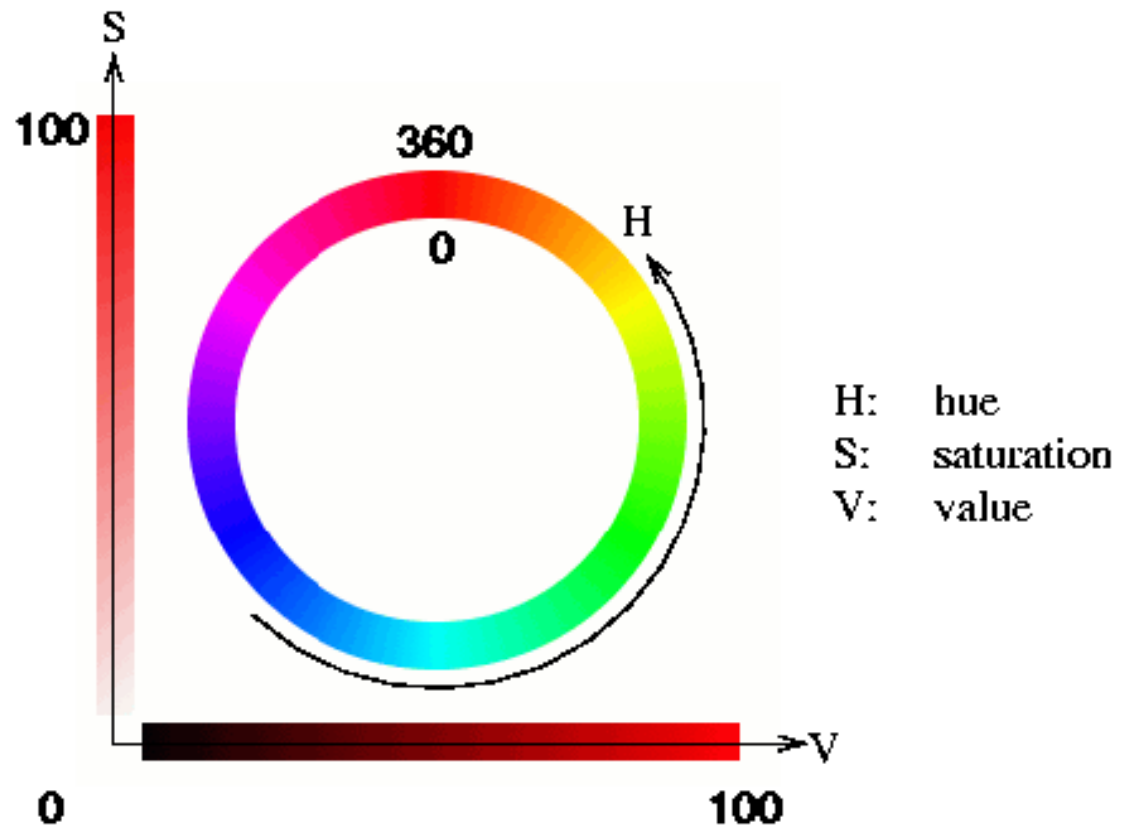
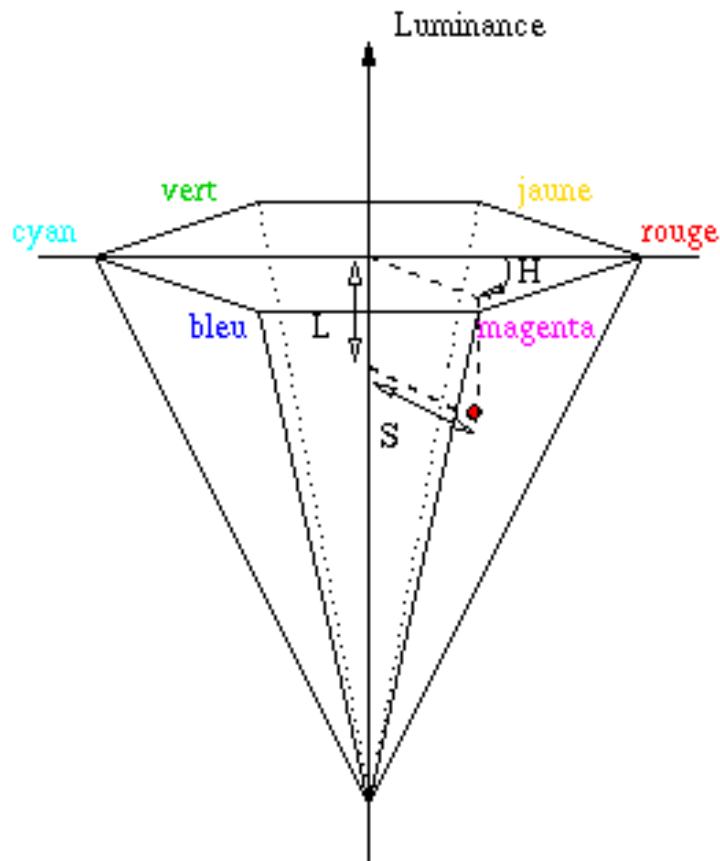
- Espace plus « intuitif »
 - Teinte : H (couleur)
 - Saturation : transition vers gris
 - Luminosité : de noir vers blanc



HSV : Hue, Saturation, value



TLS : Teinte, saturation, Luminosité



Algorithme de conversion RGB \rightarrow HSV

$$\left\{ \begin{array}{l} M = \max(R, V, B) \\ m = \min(R, V, B) \\ C = M - m \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} H = 60 \left\{ \begin{array}{ll} 0 & C = 0 \\ \frac{G - B}{C} & M = R \\ 2 + \frac{B - R}{C} & M = G \\ 4 + \frac{R - G}{C} & M = B \end{array} \right. \\ \\ S = \begin{cases} 0 & M = 0 \\ \frac{C}{M} & M \neq 0 \end{cases} \\ \\ V = M \end{array} \right. \quad H = H + 360 \text{ si } H < 0$$

CIELUV - Lu^*v^*

- Espace de couleur uniforme en perception
 - Distance euclidienne \leftrightarrow erreur perçue
 - Sous un éclairage (X_n, Y_n, Z_n)
 - Télévision et écran

$$\left\{ \begin{array}{l} L = 166 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{2}} - 16 \quad \text{si } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \\ L = 903.3 \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \quad \text{sinon} \\ u^* = 13 L (u' - u'_n) \\ v^* = 13 L (v' - v'_n) \end{array} \right.$$
$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

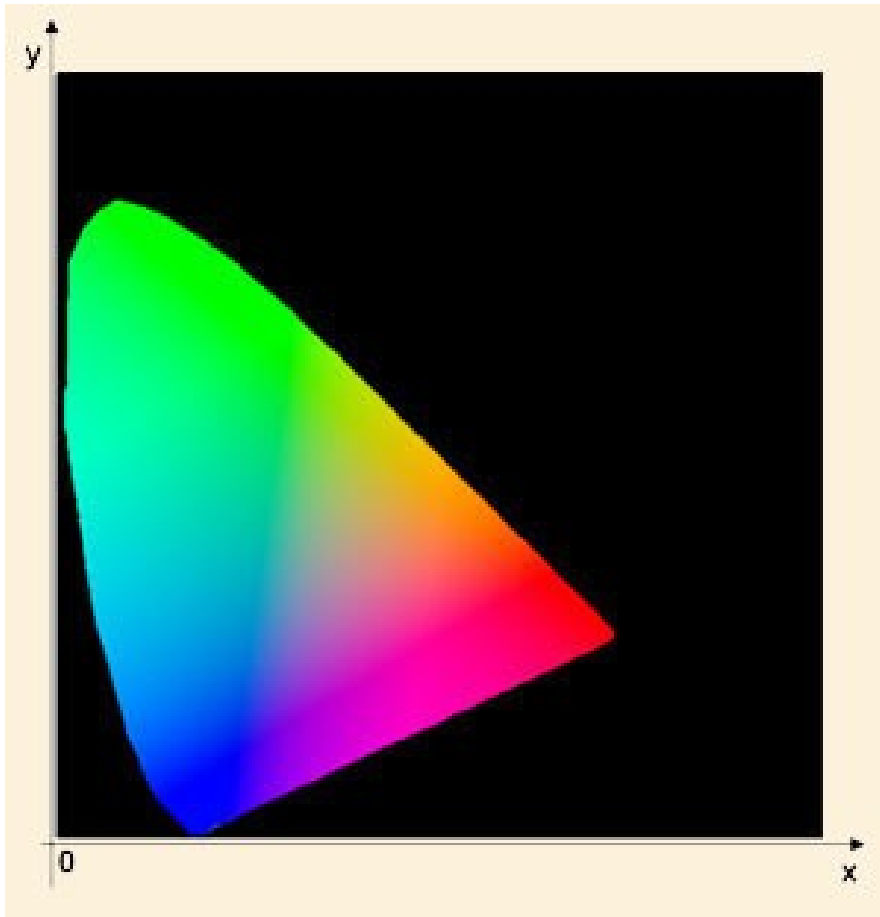
CIELUV - La^*b^*

- Espace de couleur uniforme en perception
 - Distance euclidienne \leftrightarrow erreur perçue
 - Sous un éclairage (X_n, Y_n, Z_n)
 - Impression et industrie des matériaux

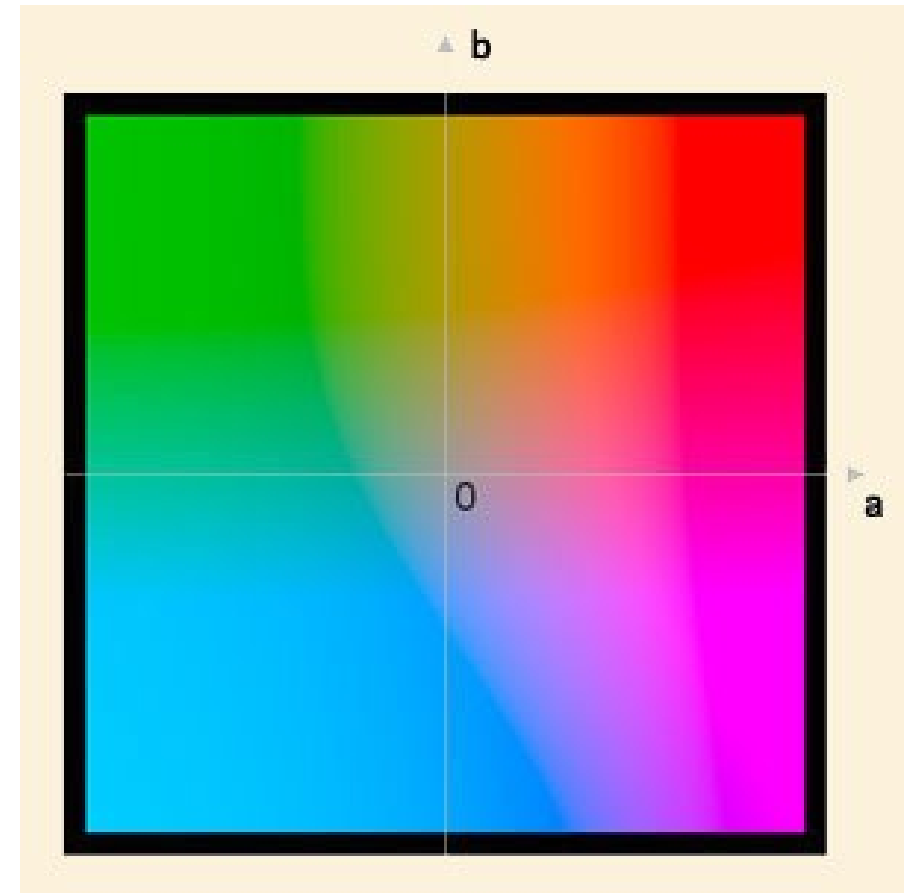
$$\begin{cases} a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \\ b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \end{cases} \quad f(r) = \begin{cases} \text{si } r > 0.008856 & r^{1/3} \\ \text{si } r \leq 0.008856 & 7.787r + \frac{16}{116} \end{cases}$$

Yxy / Lab

Espace de couleur Yxy



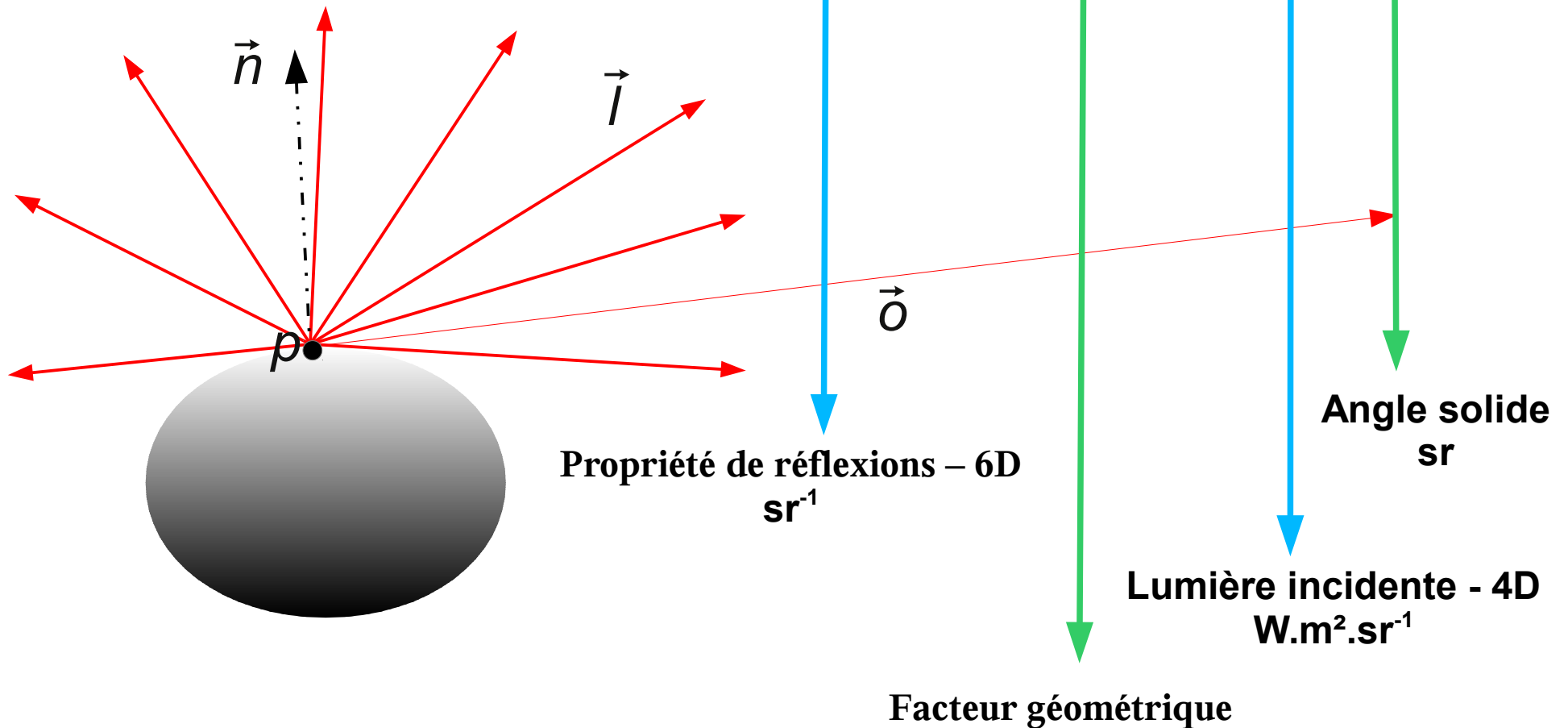
Espace de couleur Lab



Couleur et Réflexion

Calcul de la luminance réfléchie

$$L(p \rightarrow \vec{o}) = \int \rho(\vec{l} \rightarrow p \rightarrow \vec{o}) \langle \vec{n} \cdot \vec{l} \rangle L(\vec{l} \rightarrow p) d\vec{l}$$



Formulation précédente

- Valable par longueur d'onde
 - Pas de fluorescence / phosphorescence
- Comment passer en espace de couleur ?
 - Transformer BRDF / illuminant en couleur
 - Multiplier composante par composante
- Valable seulement pour un illuminant constant
 - Borges 191

Erreur lors du calcul en couleur

$$r(p \rightarrow \vec{o}) = \rho(\vec{l} \rightarrow p \rightarrow \vec{o}) L(\vec{l} \rightarrow p)$$

$$\begin{cases} \rho_X = k \int_{380}^{830} \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ \rho_Y = k \int_{380}^{830} \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ \rho_Z = k \int_{380}^{830} \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_X = k \int_{380}^{830} L(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ L_Y = k \int_{380}^{830} L(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ L_Z = k \int_{380}^{830} L(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_X = k \int_{380}^{830} r(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ r_Y = k \int_{380}^{830} r(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ r_Z = k \int_{380}^{830} r(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

Erreur lors du calcul en couleur

$$|r_x - \rho_x L_x|$$

- Semi-norme colorimétrique

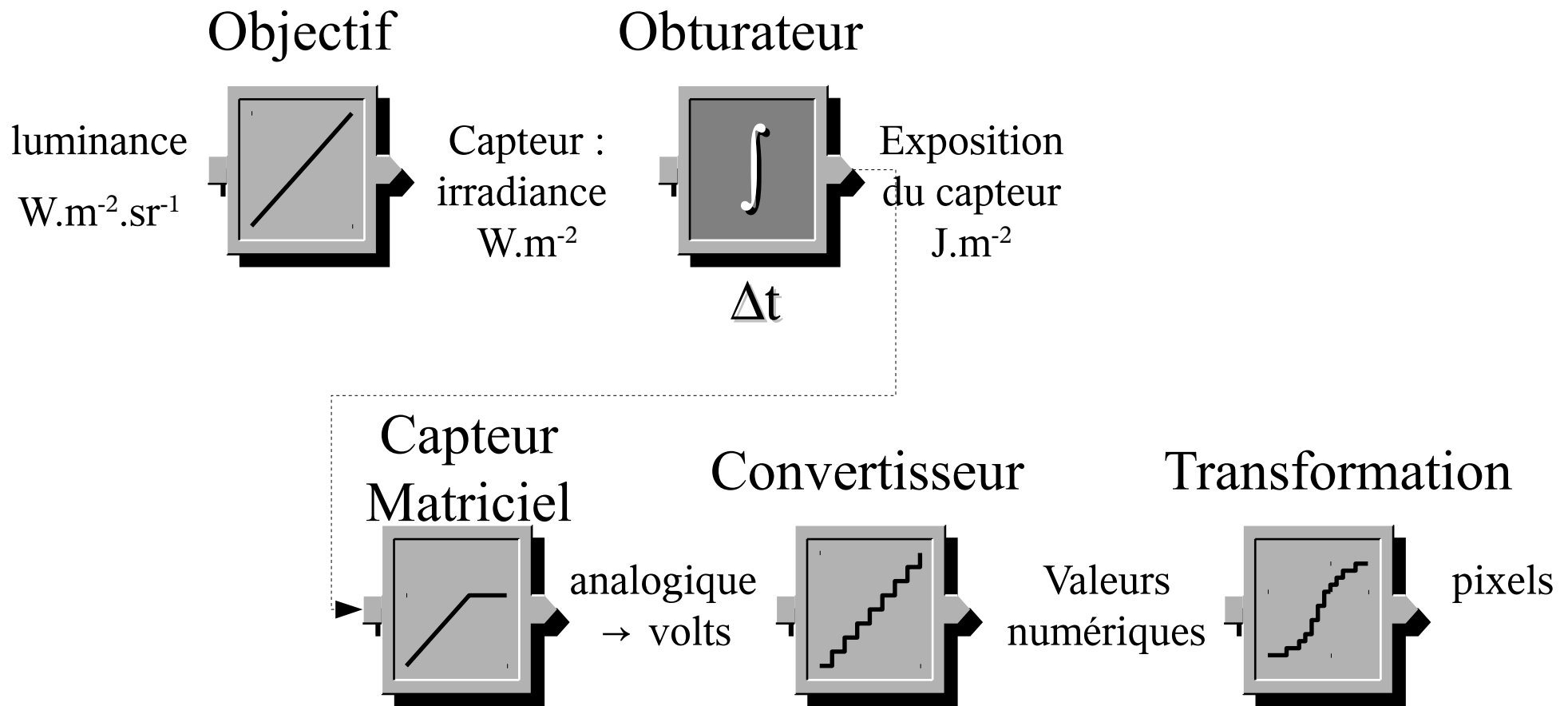
$$\|f\|_{\bar{m}} = \int_{\lambda} f^2 \bar{m} - \left(\int_{\lambda} f \bar{m} \right)^2$$

- Borne d'erreur

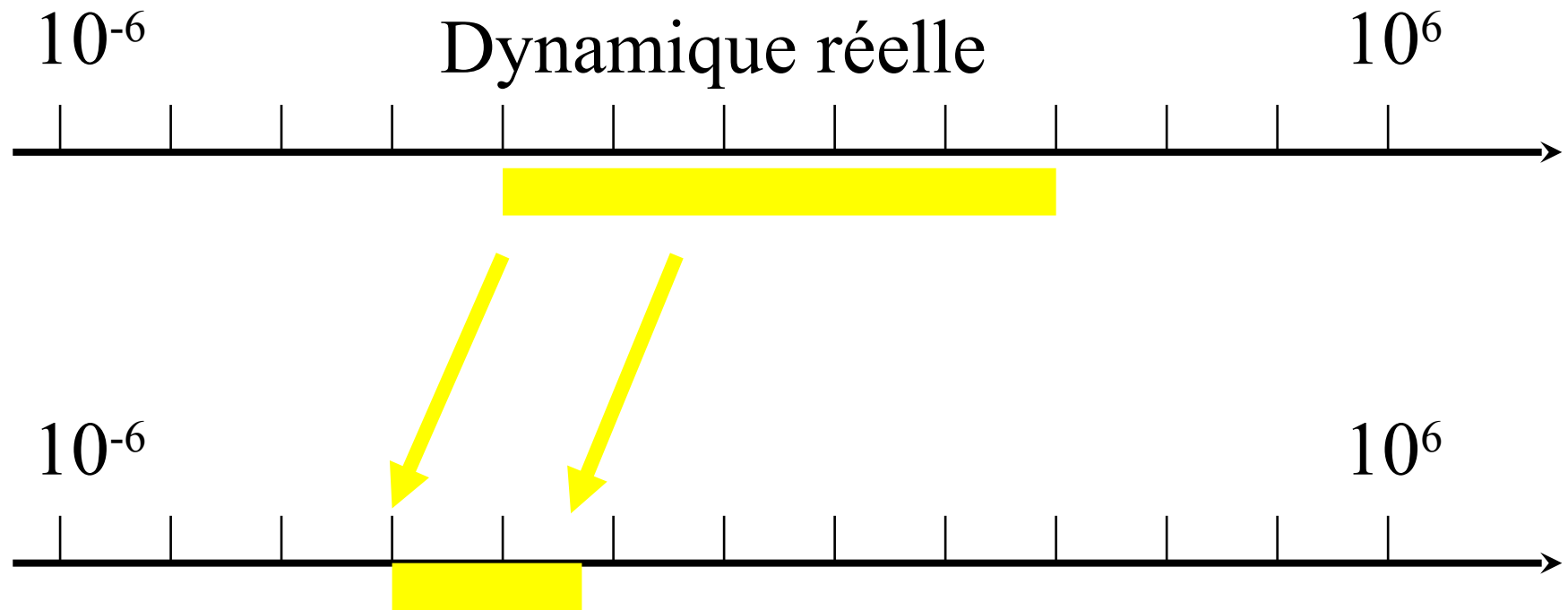
$$|r_{\bar{m}} - \rho_{\bar{m}} L_{\bar{m}}| \leq \|\rho\|_{\bar{m}} \|L\|_{\bar{m}}$$

High Dynamic Range

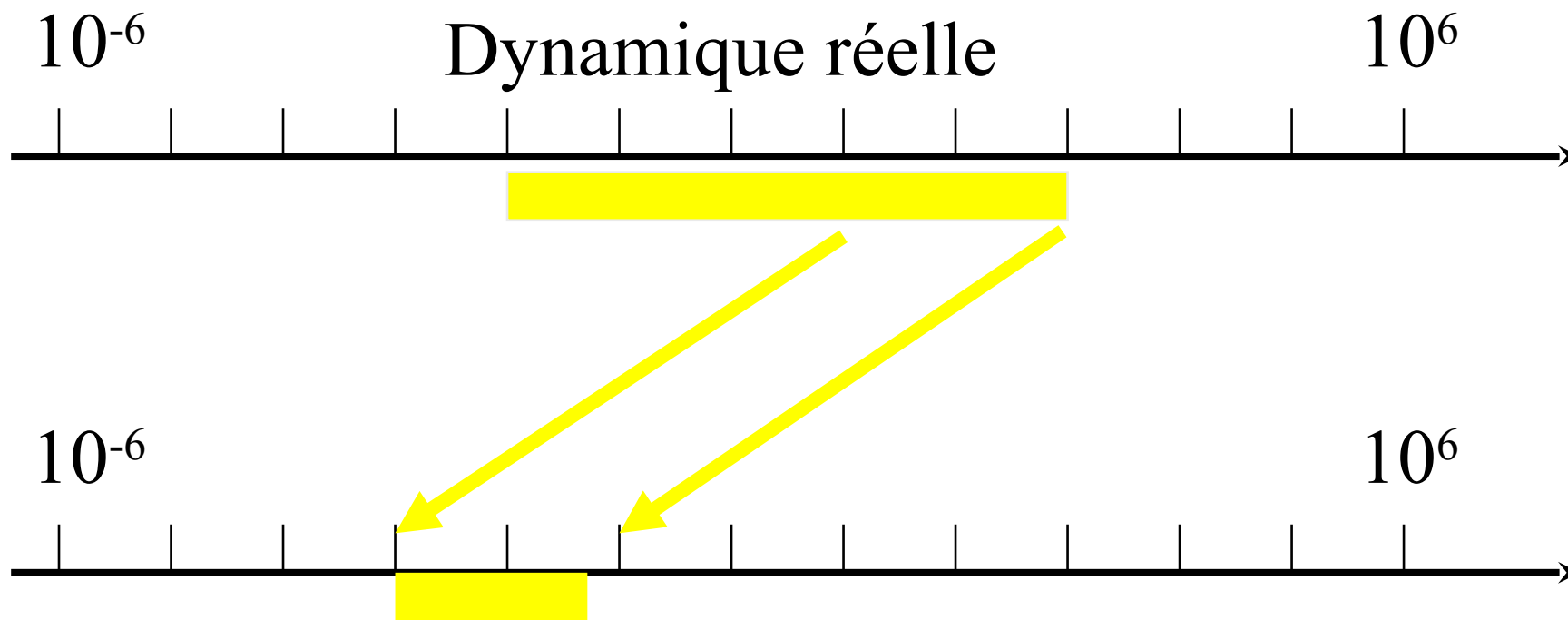
Prise d'une image



Longue exposition



Exposition courte



Du signal à la couleur numérique

- Les caractéristiques d'un capteur
 - Énergie reçue → volt (~linéaire)
- Les caractéristiques de la numérisation
 - Volt → Valeur relative encodée sur X bits

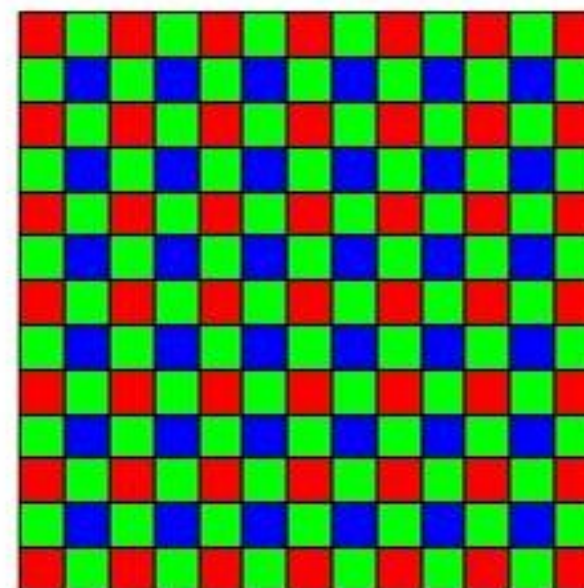
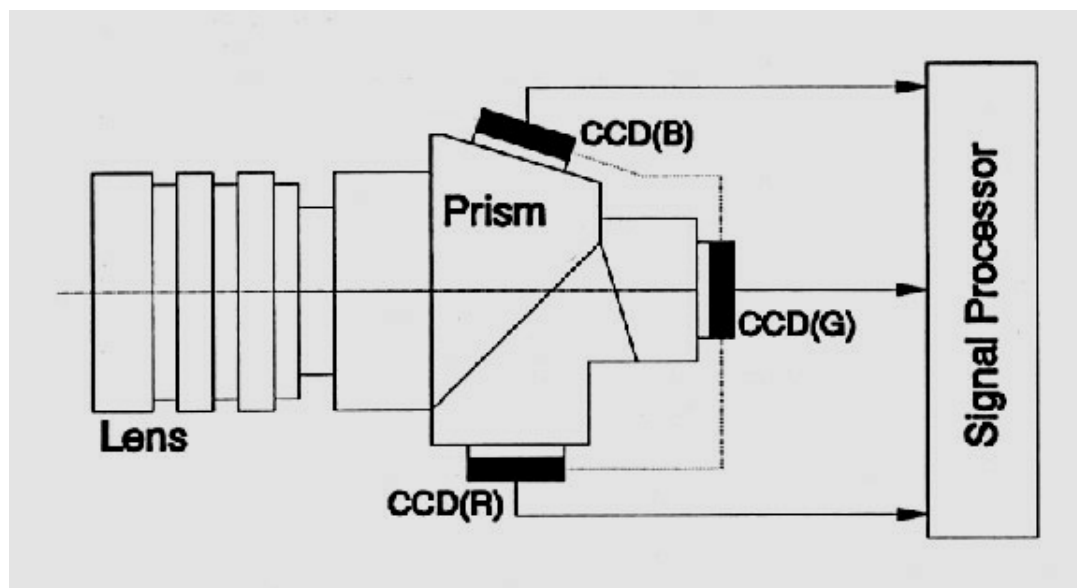
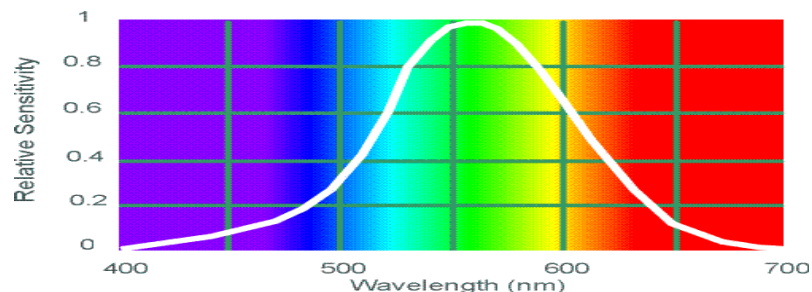
$$z_p = f(I_p \Delta t)$$

- Filtrage, réduction de bruit, interpolations (Bayer)

Color Sensing in Camera (RGB)

3-chip vs. 1-chip: quality vs. cost

Why more green?

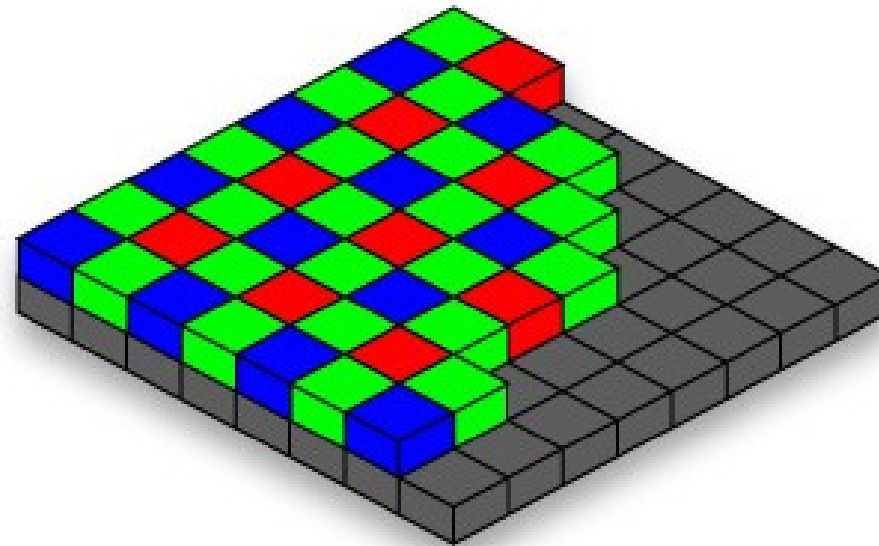


Bayer filter

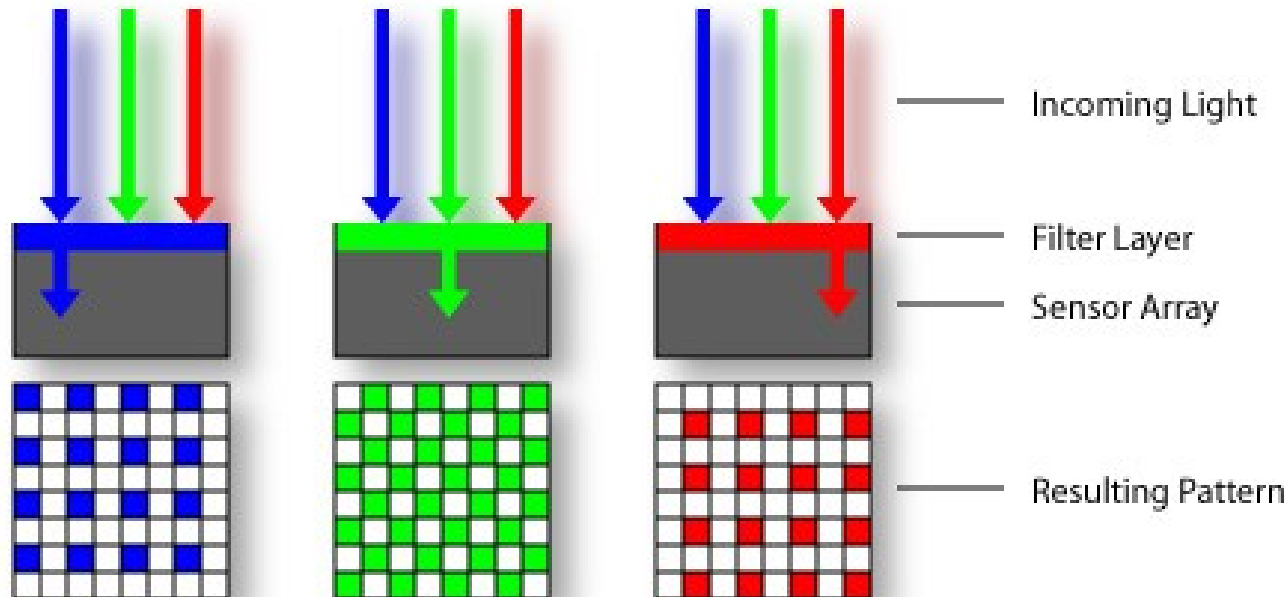
Ituff Works

Why 3 colors?

Matrice de Bayer



Estimer RGB en G depuis les valeurs voisines

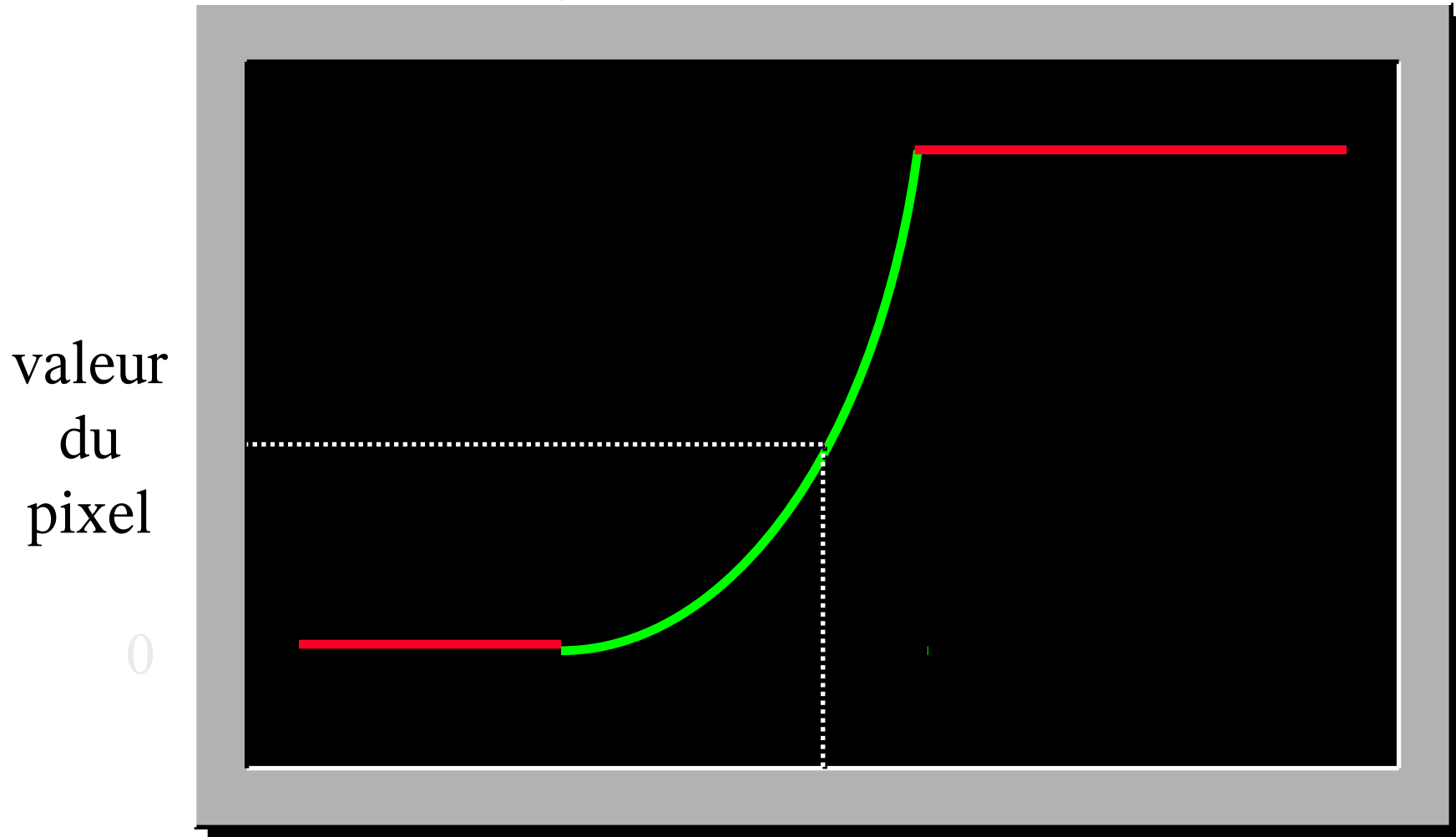


Du signal à la couleur digitale

- Les caractéristiques d'un capteur
 - Énergie reçue → réaction chimique

$$z_p = f(I_p \Delta t)$$

Courbe de réponse du système



$$\log \text{ exposition} = \log (\text{irradiance} * \Delta t)$$

Compte le nombre de photons

Capturing, Representing, and Manipulating High Dynamic Range Imagery (HDRI)



Dynamic Range in the Real World



Office interior
Indirect light from
window

1/60th sec shutter

f/5.6 aperture

0 ND filters

0dB gain

Sony VX2000 video camera

Dynamic Range in the Real World



Outside in the shade

1/1000th sec shutter

f/5.6 aperture

0 ND filters

0dB gain

16 times the light as inside

Dynamic Range in the Real World



Outside in the sun
1/1000th sec shutter

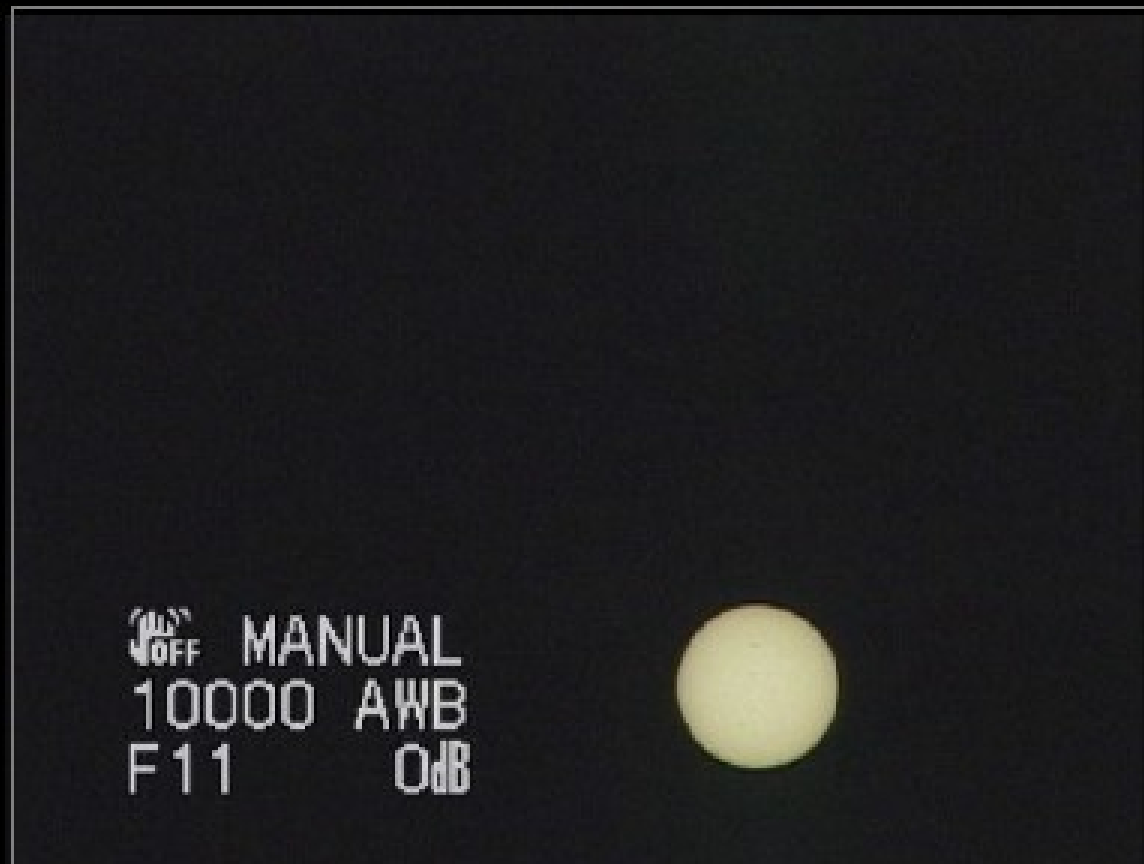
f/11 aperture

0 ND filters

0dB gain

64 times the light as inside

Dynamic Range in the Real World



Straight at the sun
1/10,000th sec shutter
f/11 aperture
13 stops ND filters
0dB gain

5,000,000 times the light as inside

Dynamic Range in the Real World



Very dim room

1/4th sec shutter

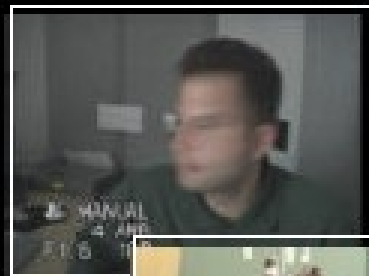
f/1.6 aperture

0 stops ND filters

18dB gain

1/1500th the light than inside

Dynamic Range in the Real World



1

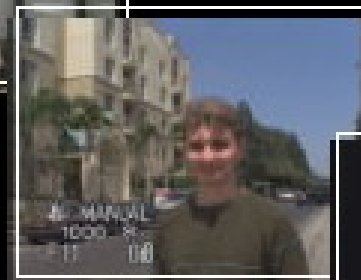
The real world is high dynamic range.



1500



25,000



400,000



2,000,000,000

Conclusion

- Caméra / Appareil photos
 - Pas de mesures radiométriques !!
 - Traitements numériques → grandeurs physiques
- Les raisons
 - Dynamique limitée (intensités de coupure)
 - Courbe de réponse souvent inconnue
 - Calibration du dispositif d'acquisition
 - Précision limitée
- Une solution
 - Multiplier les acquisitions pour retrouver les valeurs d'irradiance (ou de luminance)

Bien séparer

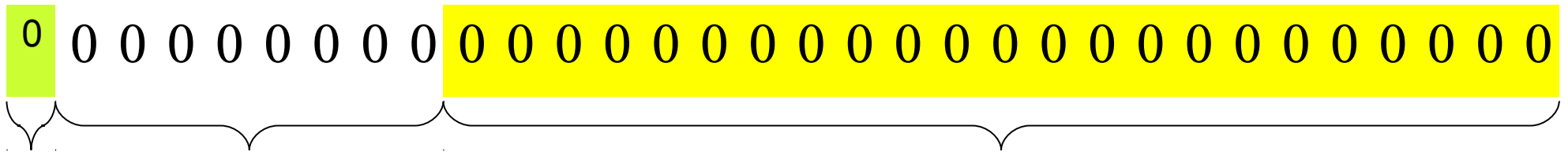
- La notion de dynamique
 - Plage de luminance / irradiance capturée
 - Ex : ouverture + sensibilité
- La notion de précision
 - Représentation colorée choisie
 - 8 bits vs 10 bits vs 14 bits...

Notion de précision numérique

- Monde réel
 - analogique / continue
- Monde numérique
 - Discret
- Représentation des nombres réels
 - Fixé : $0/255 \rightarrow 255/255$ sur 8 bits
 - Flottant : 0.2344×10^4

Format IEEE-754 : simple précision

Sur 32 bits pour une simple précision



Signe
(s)

Exposant
(e)

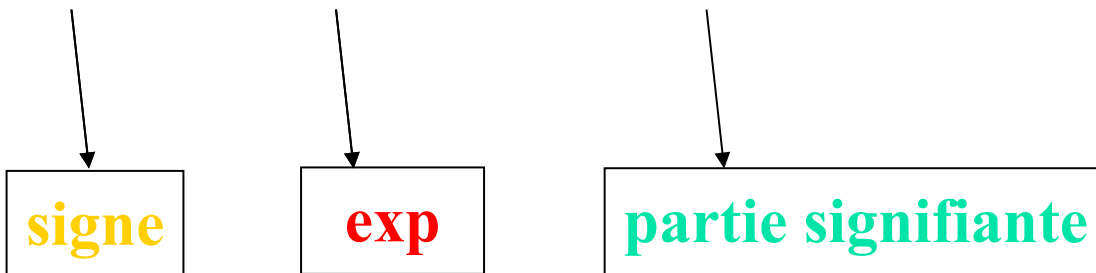
Mantisse
(m)

$$\text{Valeur} = (-1)^s \times (1.m)_2 \times 2^{e-127}$$

Exemple

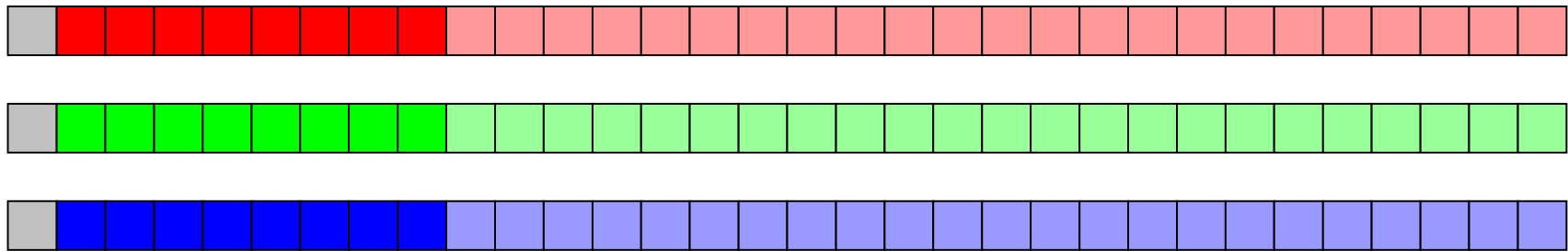
- Conversion de 37.75
 - Conversion de décimal vers binaire
100101.11
 - Normalisation
 - 1.0010111 x 2⁵

0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0



Format flottant 96 bits - TIFF

12 octets par pixel, 4 pour chaque canal



signe exposant

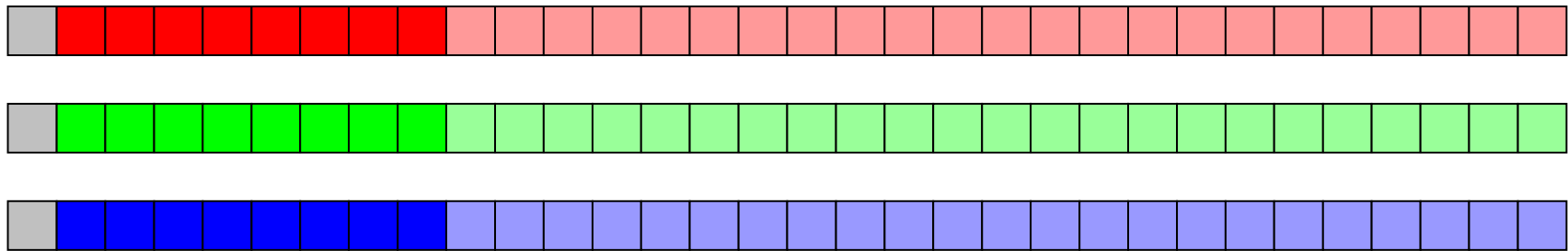
mantisse

79 ordres de magnitude

Natif sur les cartes graphiques modernes

Format flottant 96 bits - OpenEXR

12 octets par pixel, 4 pour chaque canal



signe exposant

mantisse

79 ordres de magnitude

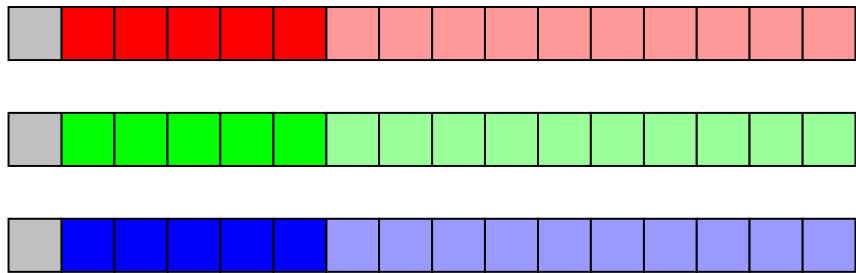
Natif sur les cartes graphiques modernes

Format flottant 48 bits - OpenEXR

6 octets par pixel, 2 pour chaque canal

signe

mantisse



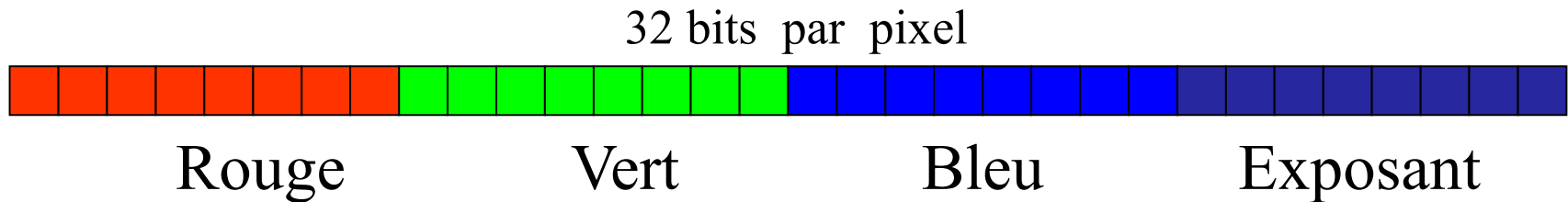
exposant

10,7 ordres de magnitude

Pas de discrétisation < 0.1 %

Natif sur les cartes graphiques modernes

Format *Radiance* (RGBE / XYZE): .pic, .hdr



$$(145, 215, 87, 149) =$$
$$(145, 215, 87) * 2^{(149-128)} =$$
$$(1190000, 1760000, 713000)$$

$$(145, 215, 87, 103) =$$
$$(145, 215, 87) * 2^{(103-128)} =$$
$$(0.00000432, 0.00000641, 0.00000259)$$

RGBE/XYZE

$$e = \left\lceil \log_2(\max(R, G, B)) \right\rceil + 128$$

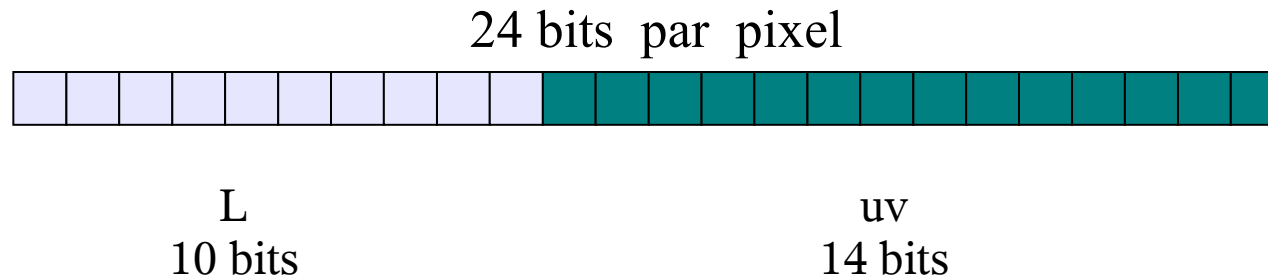
$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r+0.5 \\ g+0.5 \\ b+0.5 \end{bmatrix} \times \frac{2^{e-128}}{255}$$

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \times \frac{255}{2^{e-128}}$$

RGBE/XYZE

- Format très compact
 - 76 ordre de magnitudes
- Mais
 - Pas de quantification de 1 %
 - 76 ordre de magnitudes
 - Opérations arithmétiques non-implémentées
 - Pas de signe
 - Pas de support natif
 - R9G9B9E5

LogLuv – TIFF – 24 bits



- Espace perceptuel

- Log de la luminance Y : espace XYZ

$$L_{10} = \left\lfloor 64 \left(\log_2 \frac{Y}{\alpha} + 12 \right) \right\rfloor \quad Y = \alpha 2^{\frac{L_{10} + 0.5}{64} - 12}$$

- Couleur uv : espace CIE Luv

- Pas de 0.0035 sur tout le gammut (1 indice par couple uv)

- 4.8 ordres de magnitudes, quantification 1.1 %

LogLuv TIFF – 32 bits

32 bits par pixel



$$L_{15} = \left\lfloor 256 \left(\log_2 Y + 64 \right) \right\rfloor$$

$$Y = 2^{\frac{L_{15} + 0.5}{256} - 64}$$

$$\begin{bmatrix} u_8 \\ v_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 410 \\ 410 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{410} \begin{bmatrix} u_8 + 0.5 \\ v_8 + 0.5 \end{bmatrix}$$

- 38 ordres de magnitudes
- Pas de quantification 0.3 %

Récapitulatifs des différents formats

Encoding	Covers Gamut	Bits / pixel	Dynamic Range	Quant. Step
sRGB	No	24	1.6 (1.0:0.025)	Variable
Pixar Log	No	33	3.8 (25.0:0.004)	0.4%
RGBE	No	32	76 (1038:10 ⁻³⁸)	1%
XYZE	Yes			
LogLuv 24	Yes	24	4.8 (15.9:0.00025)	1.1%
LogLuv 32	Yes	32	38 (1019:10 ⁻²⁰)	0.3%
EXR	Yes	48	10.7 (65000:0.0000012)	0.1%
scRGB	Yes	48	3.5 (7.5:0.0023)	Variable
scRGB-nl	Yes	36	3.2 (6.2:0.0039)	Variable
scYCC-nl	Yes			

Comparaison perceptuelle des formats

- p114

Capturer un carte d'irradiance

- Matériel
 - Weiss AG pour images sphériques
 - 96 bits par pixels mais 40s par image !
 - Sinon, des ordres de magnitudes de 3 à 4
- Logiciel
 - Combiner plusieurs images
 - conditions d'exposition différentes

$$I_p \approx \sum_k \frac{w(Z_{pk})}{\sum_k w(Z_{pk})} \frac{f^{-1}(Z_{pk})}{\Delta t_k}$$

Comment changer l'exposition ?

- Ouverture
 - Attention, pas le même champ de profondeur
 - Notion de f-stop



Comment changer l'exposition ?

- Ouverture
 - Attention, pas le même champ de profondeur
- Filtres
 - Nécessite l'utilisation de plusieurs filtres



Comment changer l'exposition ?

- Ouverture
 - Attention, pas le même champ de profondeur
- Filtres
 - Nécessite l'utilisation de plusieurs filtres
- Temps d'exposition
 - Correspond directement à la formule ci-dessous

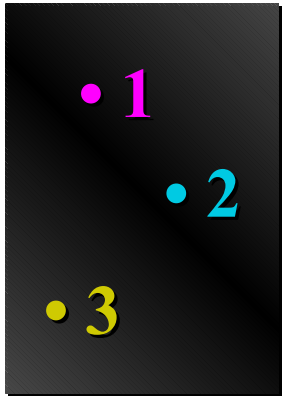
$$I_p \approx \sum_k \frac{w(Z_{pk})}{\sum_k w(Z_{pk})} \frac{f^{-1}(Z_{pk})}{\Delta t_k}$$

Variation du temps d'exposition

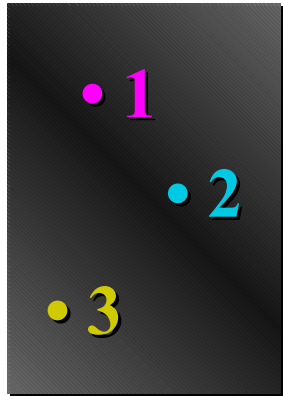
- **Exemples de vitesse d'obturation:**
 - Canon D30 : de 30 à 1/4000 secondes
 - Sony VX2000 : de $\frac{1}{4}$ à 1/10000 secondes
 - Pentax K200 : de à secondes
- **Avantages**
 - Variation linéaire de l'exposition
 - Généralement précis et répétable
- **Problèmes restants**
 - Du bruit dans les longs temps d'exposition

L'algorithme de Debevec et Malik (1997)

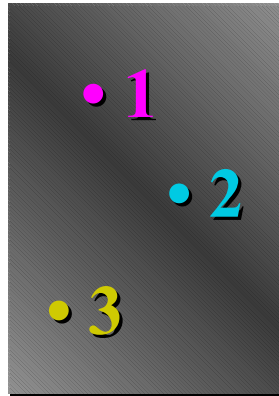
Une série d'images avec différents temps d'exposition



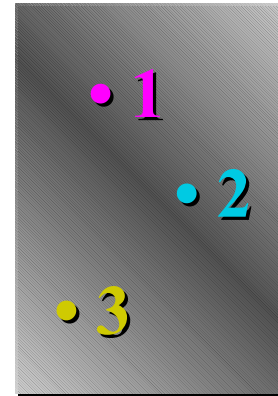
$\Delta t =$
1/64 sec



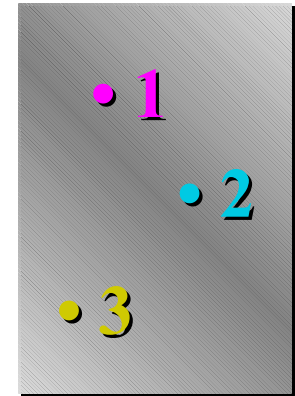
$\Delta t =$
1/16 sec



$\Delta t =$
1/4 sec



$\Delta t =$
1 sec



$\Delta t =$
4 sec

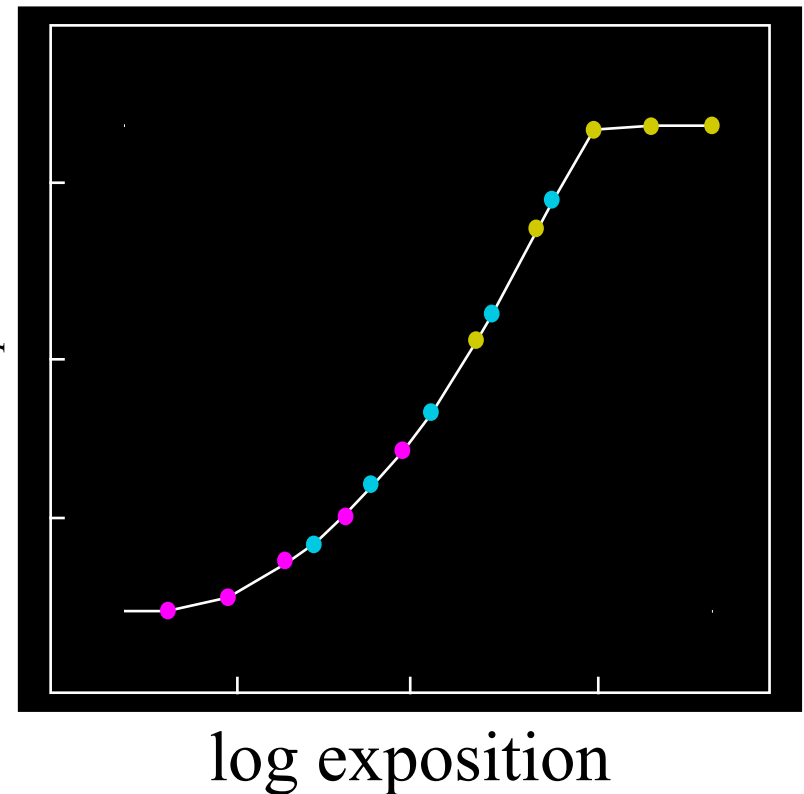
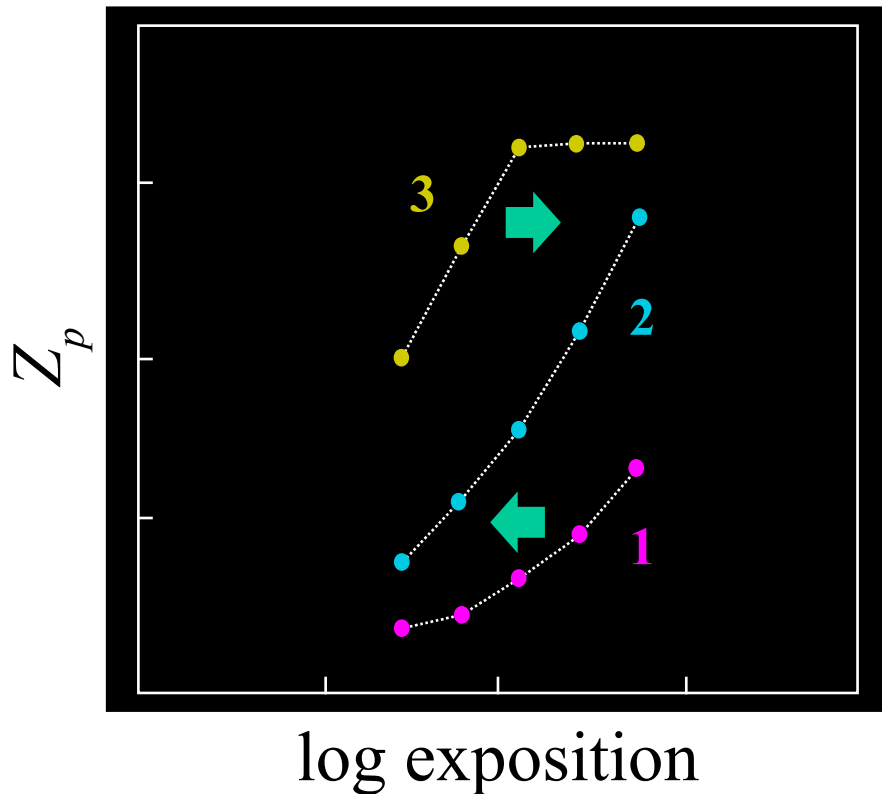
$$Z_{pk} = f(E_p \Delta_k)$$

$$\log f^{-1}(Z_{pk}) = \log E_p + \log \Delta_k$$

L'intuition : trouver la courbe de réponse

Hypothèse : $E_p = 1$

Ajuster les valeurs de E_p pour obtenir
une courbe de réponse lisse



Comment faire ?

- $g(z)$
 - logarithme de fonction de réponse inverse
 - tabulée

- On a donc
$$g(Z_{pk}) = \log E_p + \log \Delta_k$$

- Fonction d'objectif (optimisation)

$$\underbrace{\sum_k \sum_p \left[\log E_p + \log \Delta_k - g(Z_{pk}) \right]^2}_{\text{Moindres carrés}} + \lambda \underbrace{\sum_{z=Z_{\min}-1}^{Z_{\max}+1} \partial_{zz}^2 g(z)^2}_{\text{Terme de lissage}}$$

Moindres carrés

Terme de lissage

Code matlab

```
function [g,lE]=gsolve(Z,B,l,w)

n = 256;
A = zeros(size(Z,1)*size(Z,2)+n+1,n+size(Z,1));
b = zeros(size(A,1),1);

k = 1;           %% Include the data-fitting equations
for i=1:size(Z,1)
    for j=1:size(Z,2)
        wij = w(Z(i,j)+1);
        A(k,Z(i,j)+1) = wij; A(k,n+i) = -wij; b(k,1) = wij * B(i,j);
        k=k+1;
    end
end

A(k,129) = 1;           %% Fix the curve by setting its middle value to 0
k=k+1;

for i=1:n-2           %% Include the smoothness equations
    A(k,i)=l*w(i+1); A(k,i+1)=-2*l*w(i+1); A(k,i+2)=l*w(i+1);
    k=k+1;
end

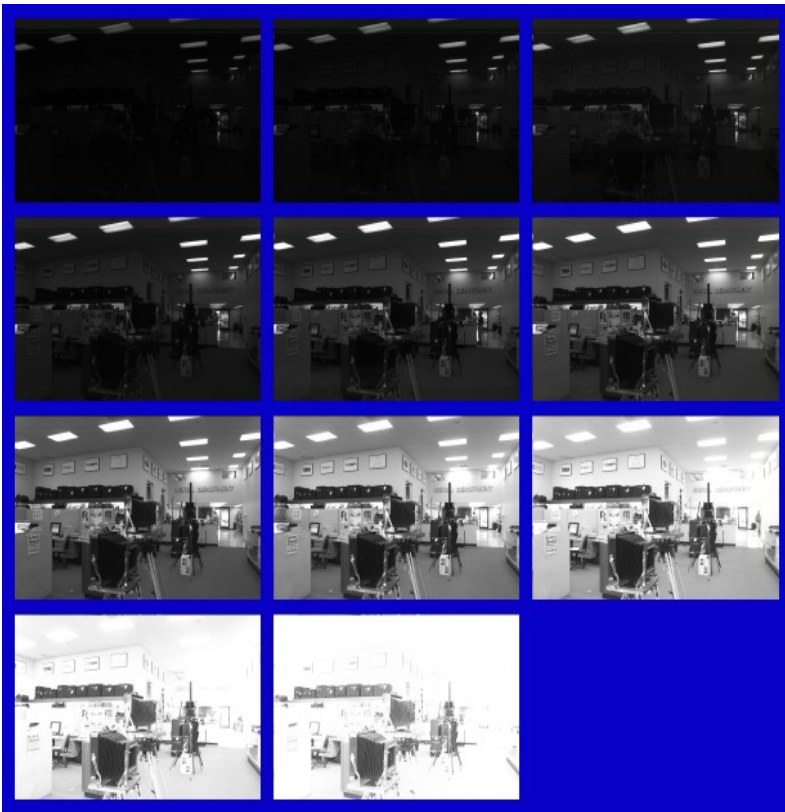
x = A\b;           %% Solve the system using SVD

g = x(1:n);
lE = x(n+1:size(x,1));
```

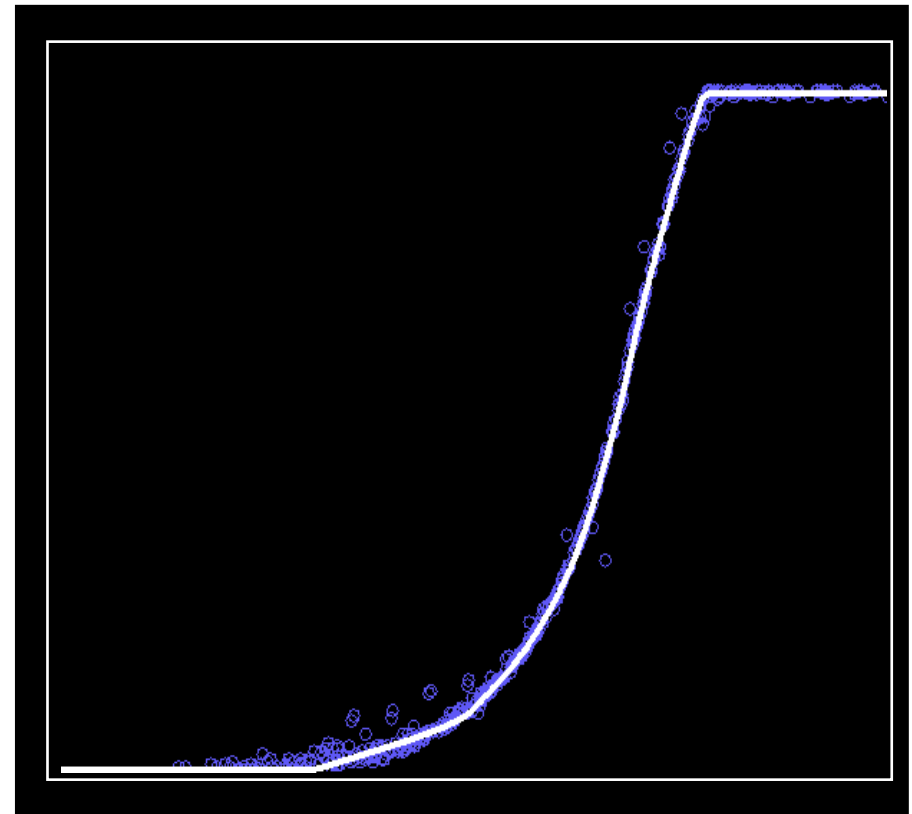
Résultat sur un Kodak DCS460

Temps d'exposition
de 1/30 à 30 sec

Courbe de réponse trouvé



Z_p



log Eposition

Carte d'irradiance trouvée



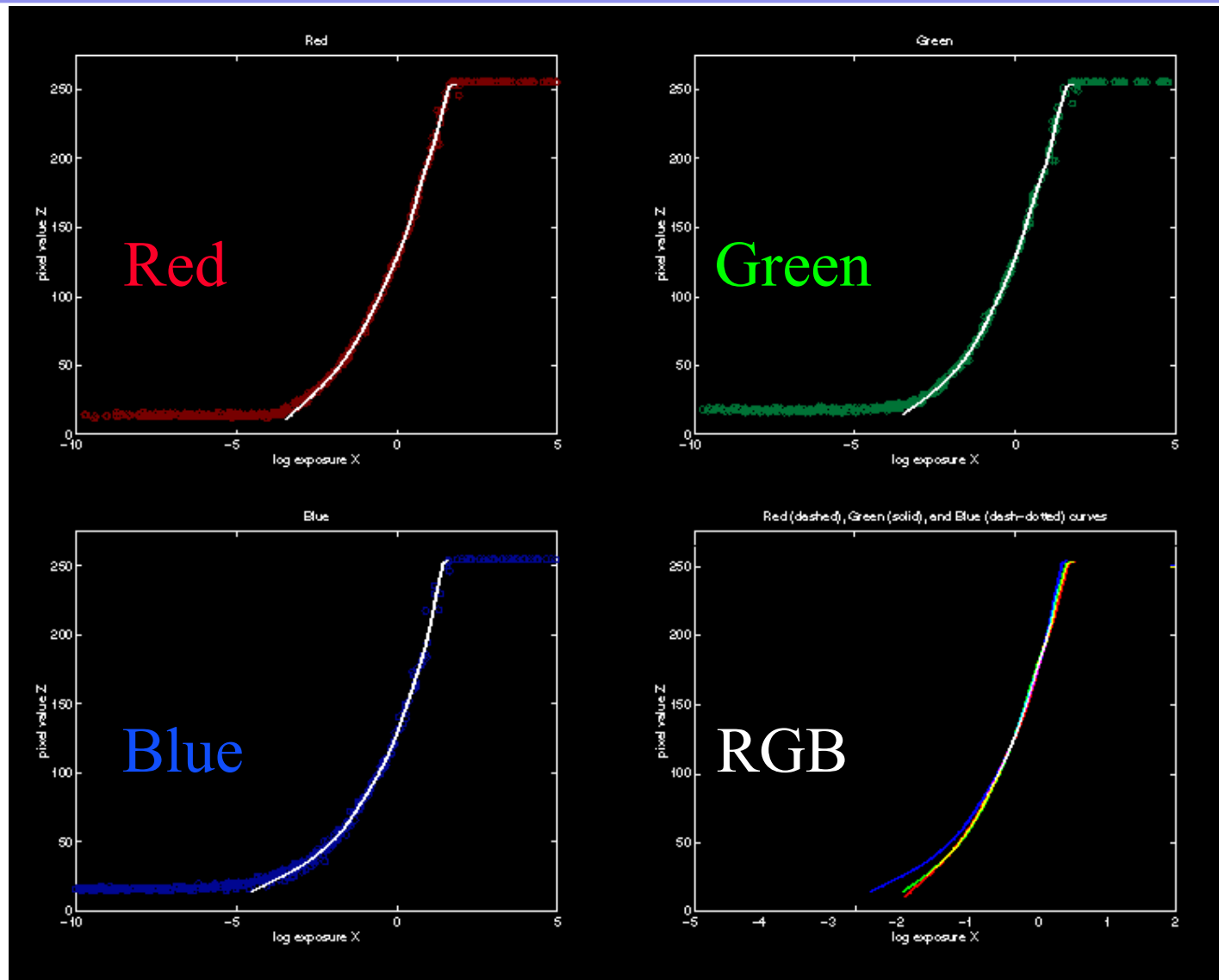
Attention, à un facteur multiplicatif près !!!

Résultat sur un film classique couleur

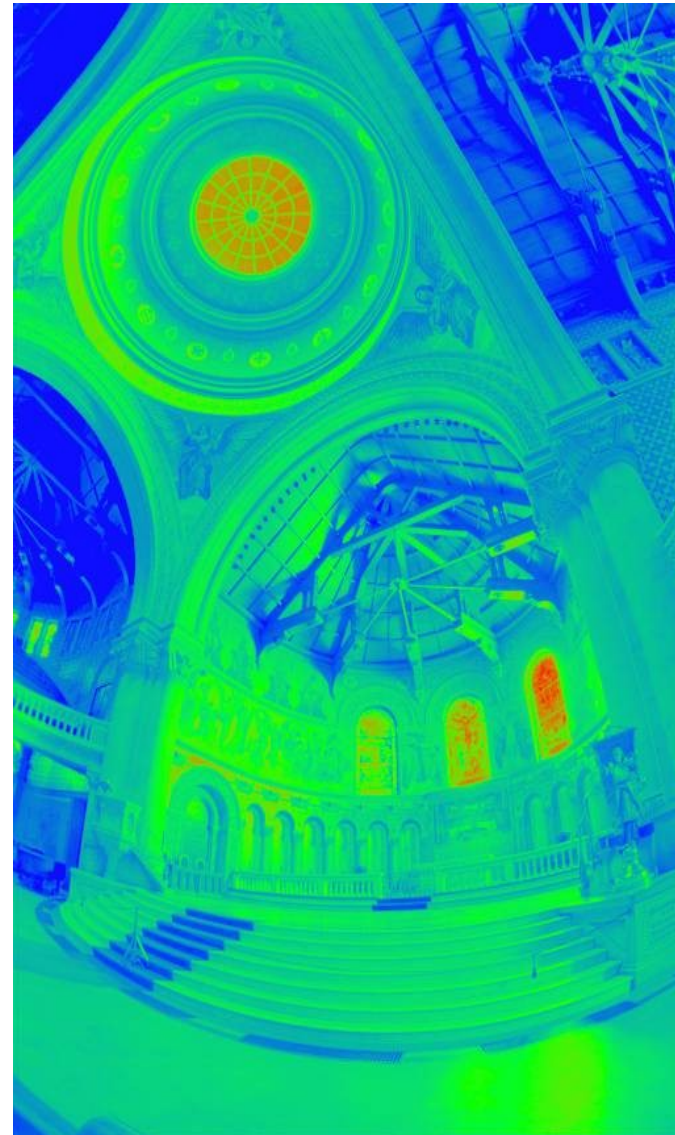
Kodak Gold ASA 100, PhotoCD



Courbes de réponse par couleur

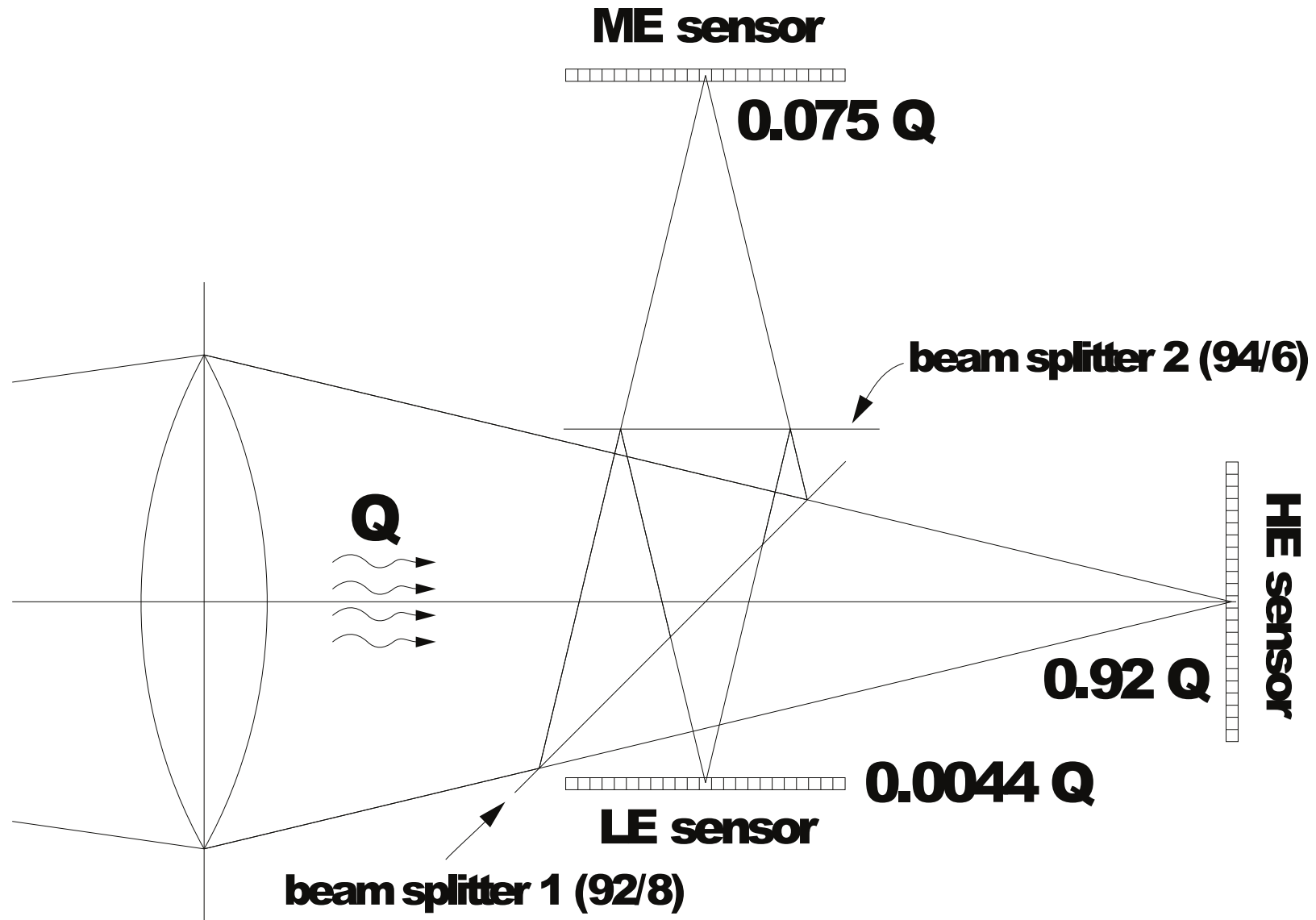


Carte d'irradiance

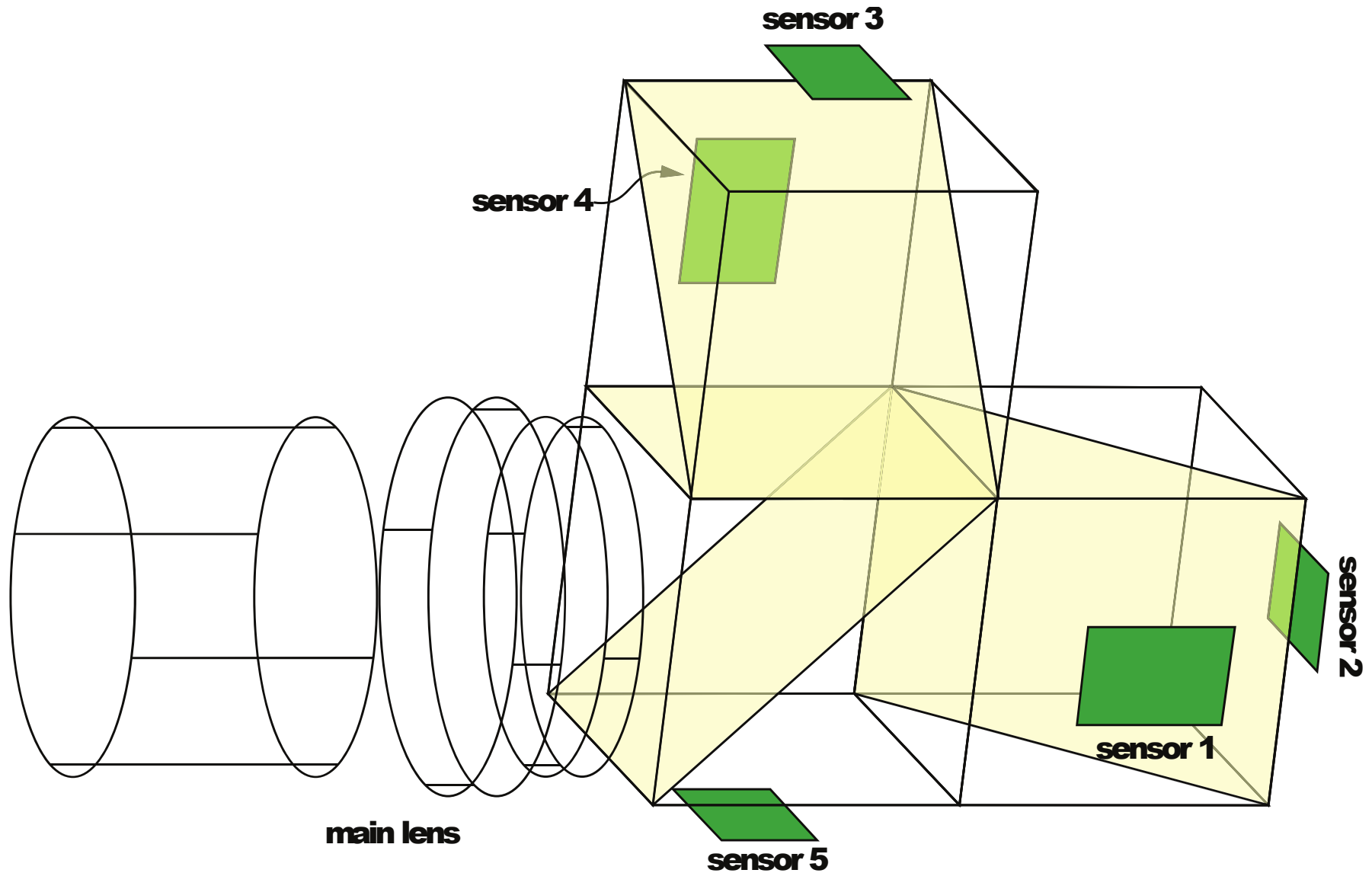


Limitations ?

Vers une caméra vidéo HDR

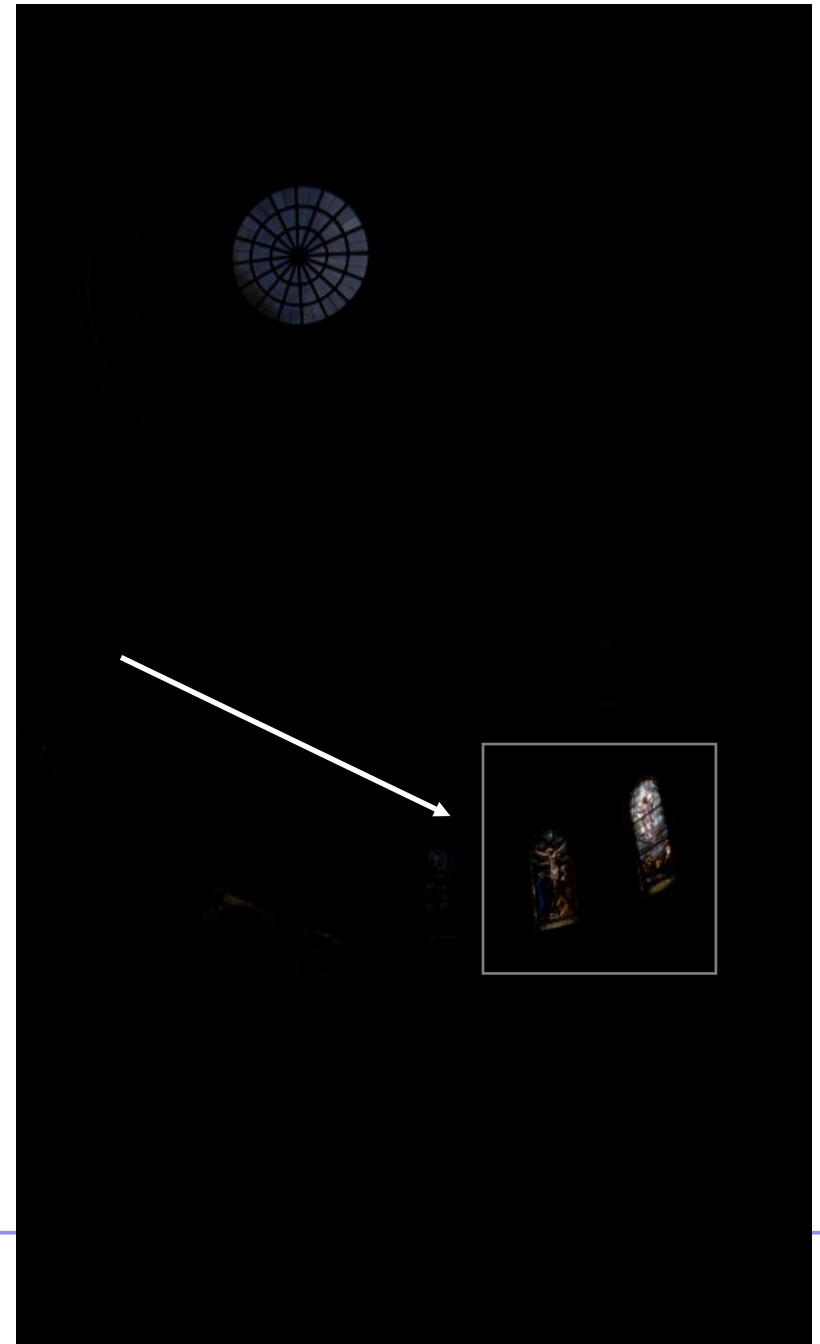
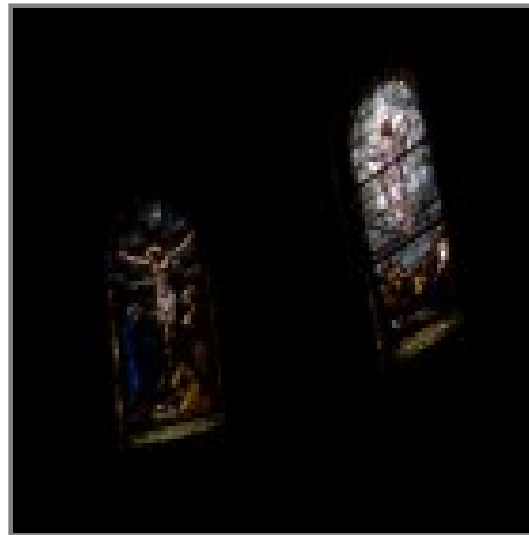


Vers une caméra vidéo HDR



Comment afficher une telle image ?

Mise à l'échelle linéaire

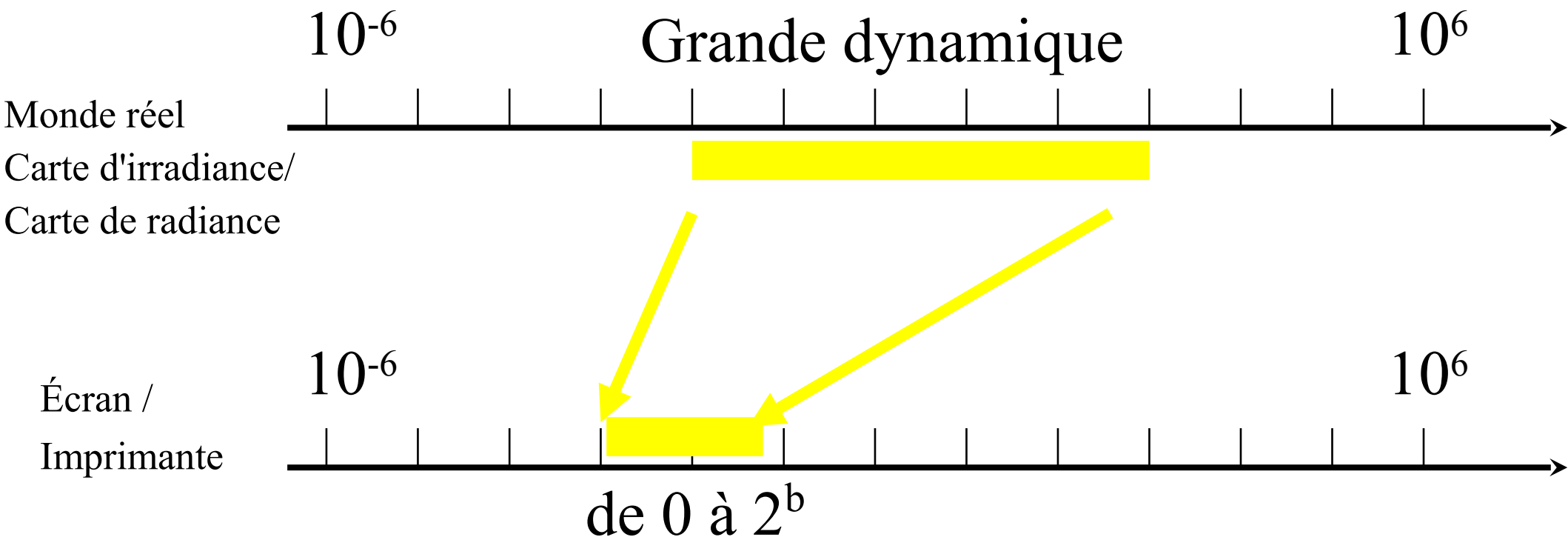


↔ Variation du temps d'exposition
sur un capteur linéaire

Correction de ton (Tone Mapping)

- Simuler un système réel ou virtuel
- Différentes solutions

Transformation linéaire, intensités de coupure,

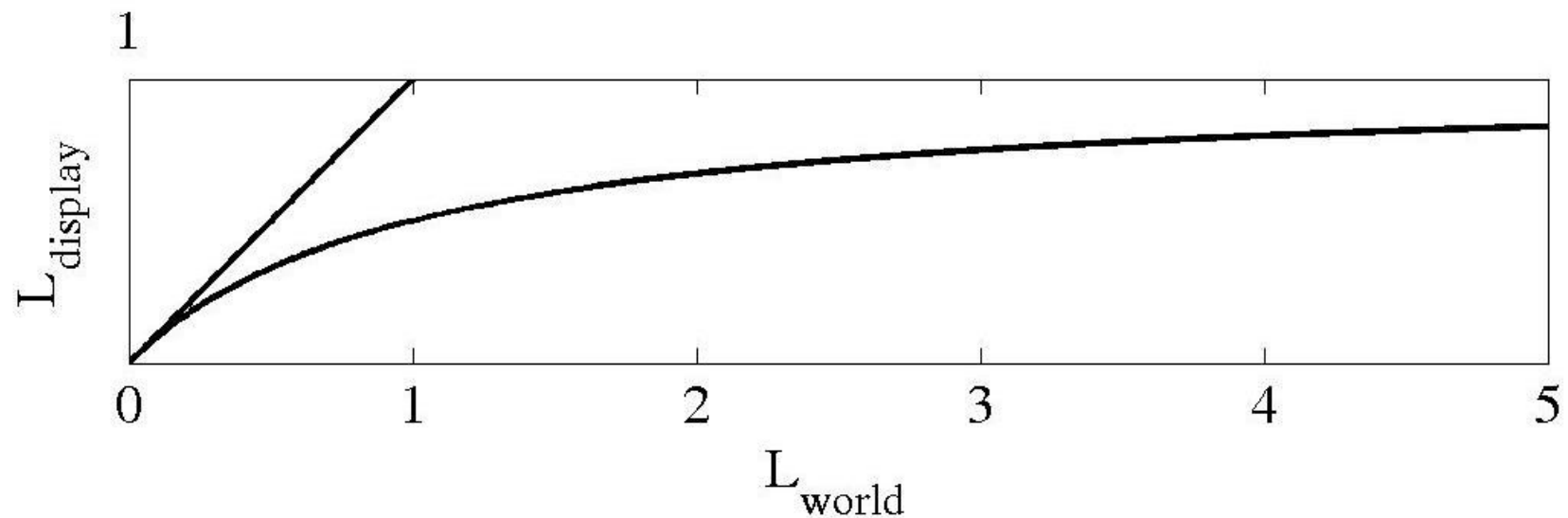


Transformations simples globales

- La « courbe » de transformation globale doit
 - Ramener le maximum dans l'intervalle visible
 - Laisser les zones de luminance nulle
 - Garder les variations locales
- Exemple 1 : Reinhardt et al.
 - Dérivée = 1 à 0
 - Monotone
 - Temps vers 1 pour les intensités maximales

Exemple 1: Reinhart et al.

$$L_{\text{display}} = \frac{\alpha L_{\text{world}}}{1 + \alpha L_{\text{world}}}$$



Reinhart et al.



Autres opérateurs globaux (exemples)

- Gamma : courbe de réponse classique

$$L_{\text{display}} = \left(\frac{L_{\text{world}}}{L_{\text{max}}} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

- Schlick 1994
 - Fonctions rationnelles

$$L_{\text{display}} = \frac{p L_{\text{world}}}{p L_{\text{world}} - L_{\text{world}} + L_{\text{max}}}$$

Autres opérateurs de ton

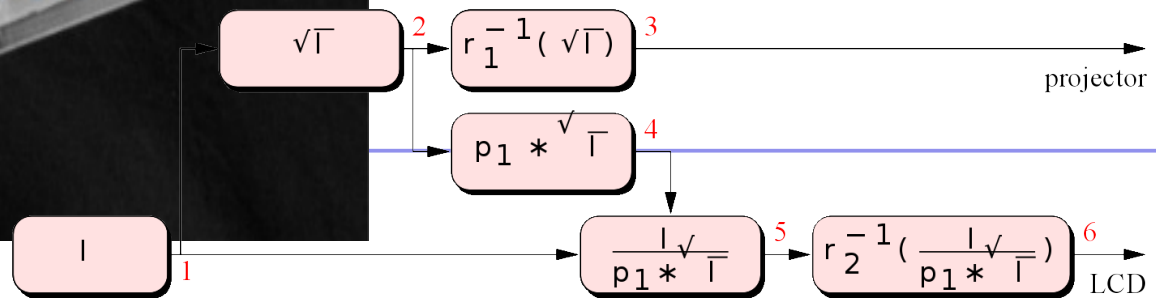
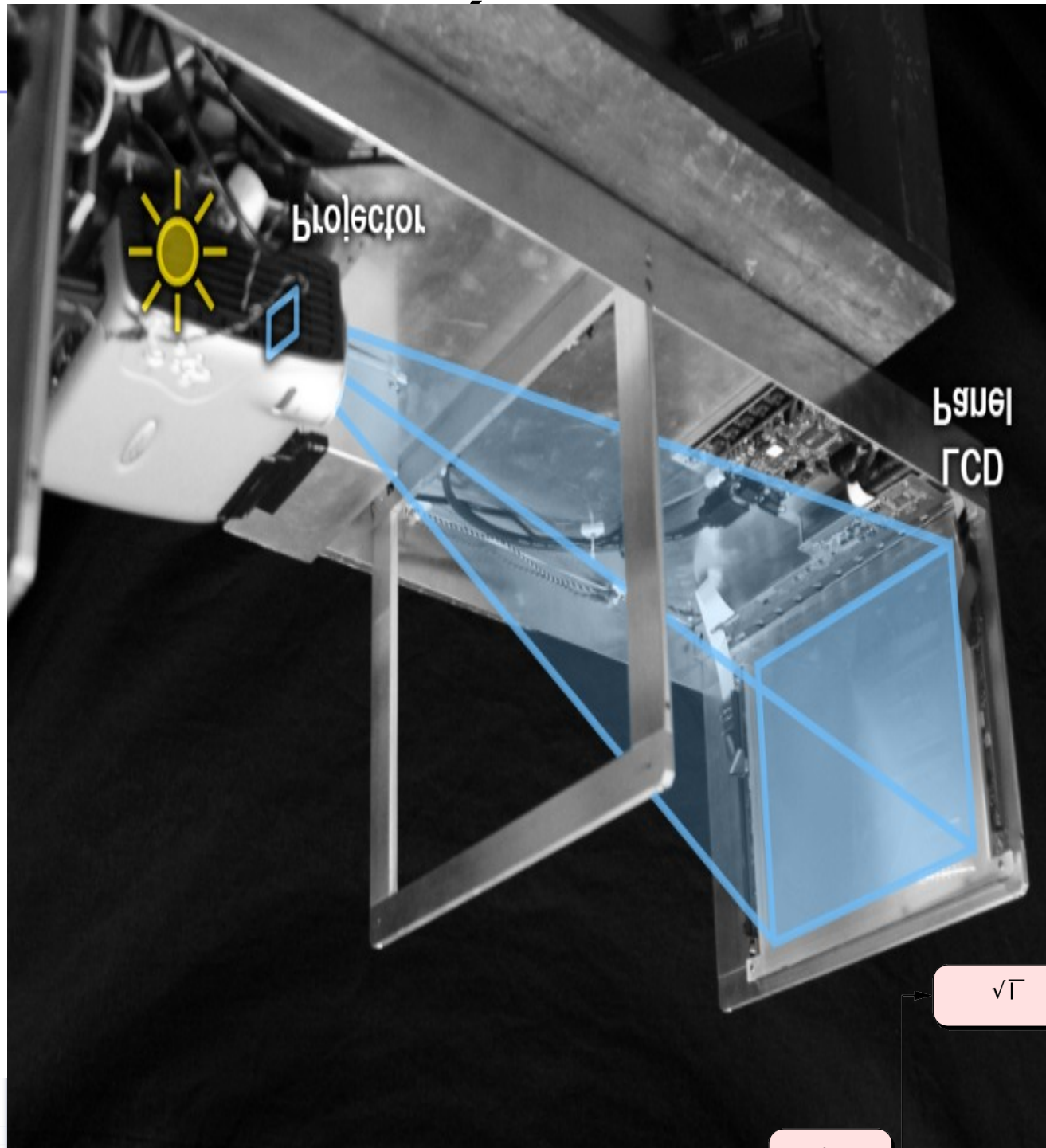
- Famille perceptuelle
 - Simuler les phénomènes d'adaptation de l'œil
 - Ex : perte de couleur dans les faibles intensités
- Adaptation locale
 - Principe : utiliser une information locale
 - Ex : moyenne
 - Adaptation relative à cette valeur

Autre solution : vers un écran HDR

- Principe : augmenter le taux de contraste
 - Mise en cascade de systèmes d'affichages
- Ecran 1 : taux de contraste $c1:1$
- Ecran 2 : taux de contraste $c2:1$
- Total : taux de contraste $c1*c2:1$

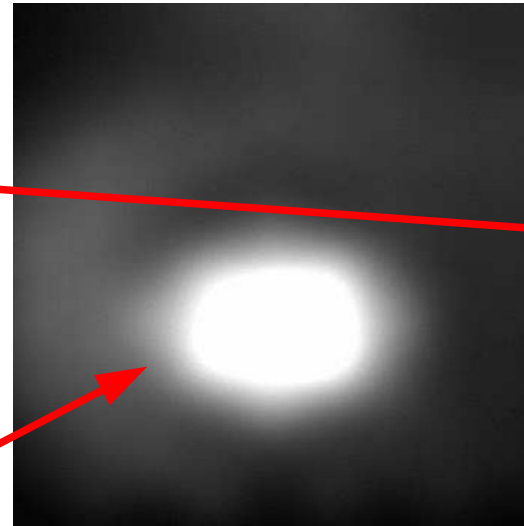
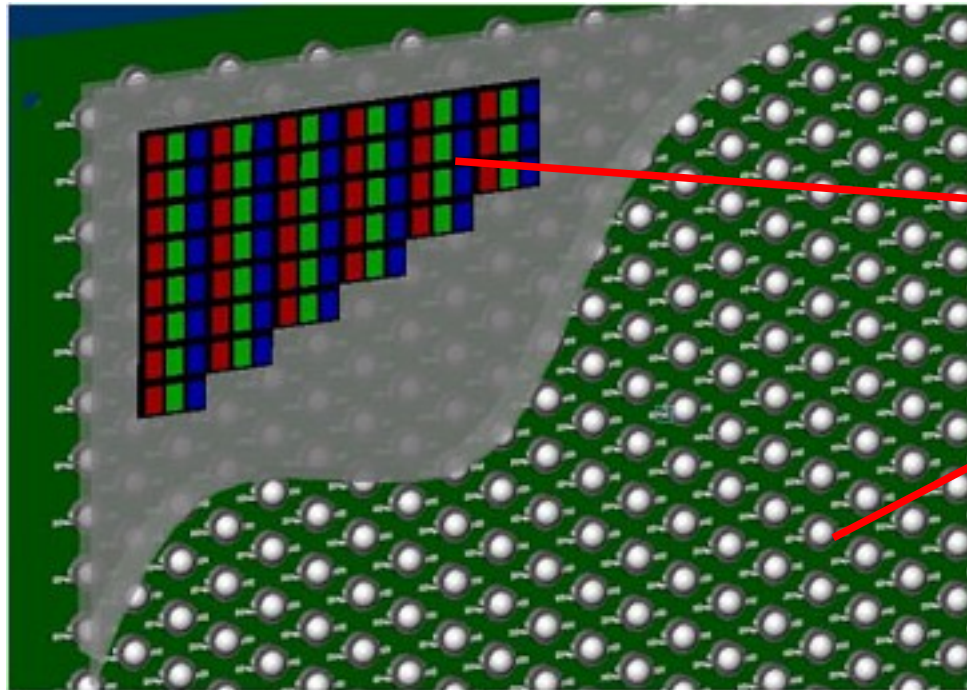
type 1

par un LCD



Écran HDR : prototype 2

Grille de LED de puissance modulé par un LCD



©2005 Brightside Technologies Inc. Proprietary & Confidential

