

Colorimétrie

Traitement d'images appliqué aux images aériennes
Mastère PPMD – 2011/2012

Plan du cours

- Notions de colorimétrie
 - Définitions
 - Le triplet lumière, observateur, objet
 - Les systèmes colorimétriques
- Gestion de la couleur d'une chaîne de traitement d'images
 - Intérêt et principe de la gestion de la couleur
 - Les appareils de mesure de la couleur
 - Exemples d'étalonnage colorimétrique : cas des écrans et des caméras

Notions de colorimétrie

Définitions

- **Radiométrie** : science de la mesure des grandeurs relatives à l'ensemble des rayonnements du spectre électromagnétique.
- **Photométrie** : science qui étudie le rayonnement lumineux du point de vue de la perception par l'œil humain.
- **Colorimétrie** : science de la mesure des couleurs
- **Couleur** : perception par l'œil d'une ou plusieurs fréquences d'ondes lumineuses, avec une (ou des) amplitude(s) donnée(s)
- 2 aspects :
 - Physique < rayonnement
 - Physiologique + psychologique < œil + cerveau

Contexte

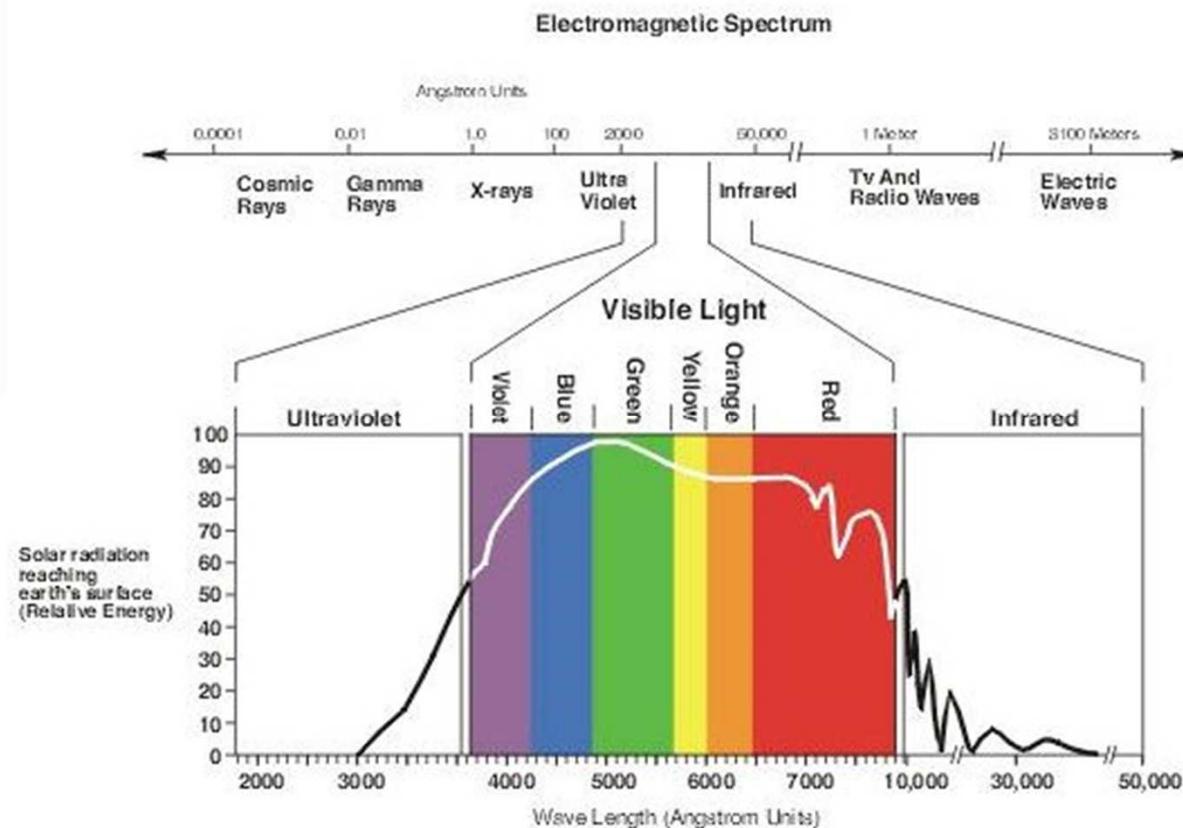
- Les outils de gestion de la couleur commencent à être présents dans les logiciels de traitement d'image
- Le domaine “semble” bien encadré :
 - CIE : Commission Internationale de l’Éclairage : organisation internationale dédiée à la lumière, l'éclairage, la couleur, les espaces de couleur.
 - ICC : International Color Consortium : association de huit professionnels de l'industrie, dans le but de créer un système universel de gestion des couleurs qui fonctionnerait de manière transparente quel que soit le système d'exploitation et le logiciel utilisé.
- La concurrence entre systèmes de prise de vues aériennes, entre orthophotographies pourrait s'établir sur ce créneau ; la qualité colorimétrique pourrait devenir un argument commercial

Colorimétrie et géomatique

- En photographie et orthophotographie
 - étalonnage colorimétrique des :
 - Des caméras
 - Des imprimantes (notamment agrandisseur numérique)
 - Des postes de travail (écrans)
 - définition d'un référentiel colorimétrique ?
- Cartographie
 - définition des couleurs de la carte
 - chaîne d'impression
 - ...

Colorimétrie : rappels

- Rayonnement électromagnétique
 - lumière = ensemble des ondes électromagnétiques visibles ($\lambda \approx 380\text{-}780\text{nm}$)



Colorimétrie : introduction

- Comment la couleur est-elle produite?
 - couleur lumière
 - objets qui produisent seuls de la lumière
 - rayonnements de longueur d'onde ≠ se combinent
 - sources : incandescente, lumière du jour ...
 - synthèse additive : opération consistant à combiner la lumière de plusieurs sources émettrices colorées afin d'obtenir une nouvelle couleur.

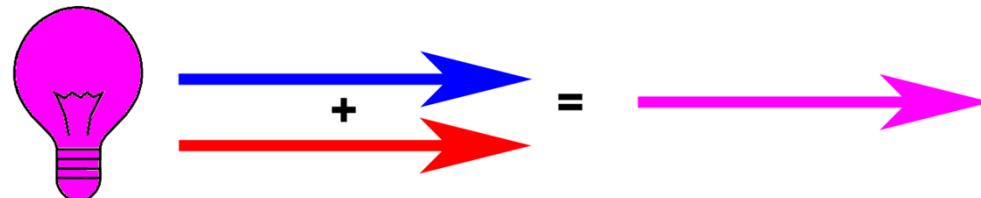


Illustration du principe de synthèse additive : des rayonnements de longueurs d'onde différentes se combinent

Colorimétrie : introduction

- Comment la couleur est-elle produite?
 - couleur objet
 - couleur produite par interaction avec une source lumineuse
 - objets opaques ou transparents
 - synthèse soustractive

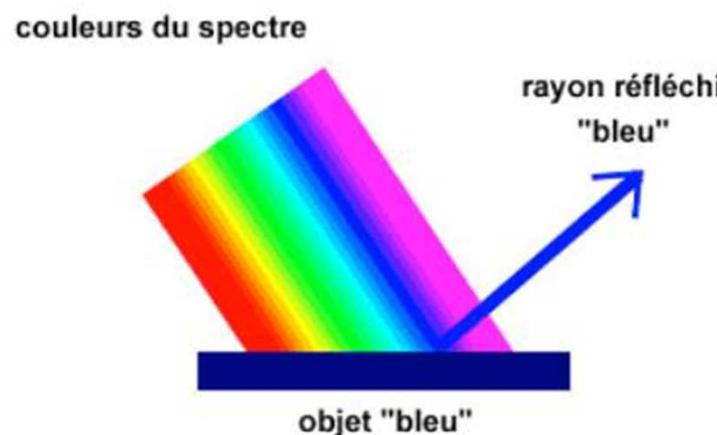
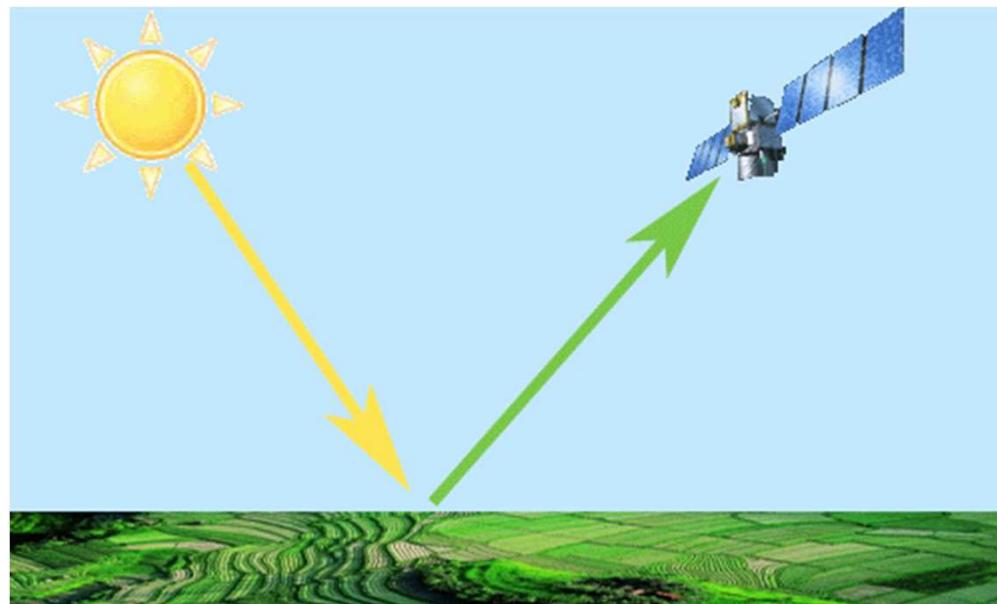


Illustration du principe de synthèse soustractive : un objet bleu absorbe toutes les couleurs du spectre visible sauf le bleu qui est réflechi

3 notions complémentaires

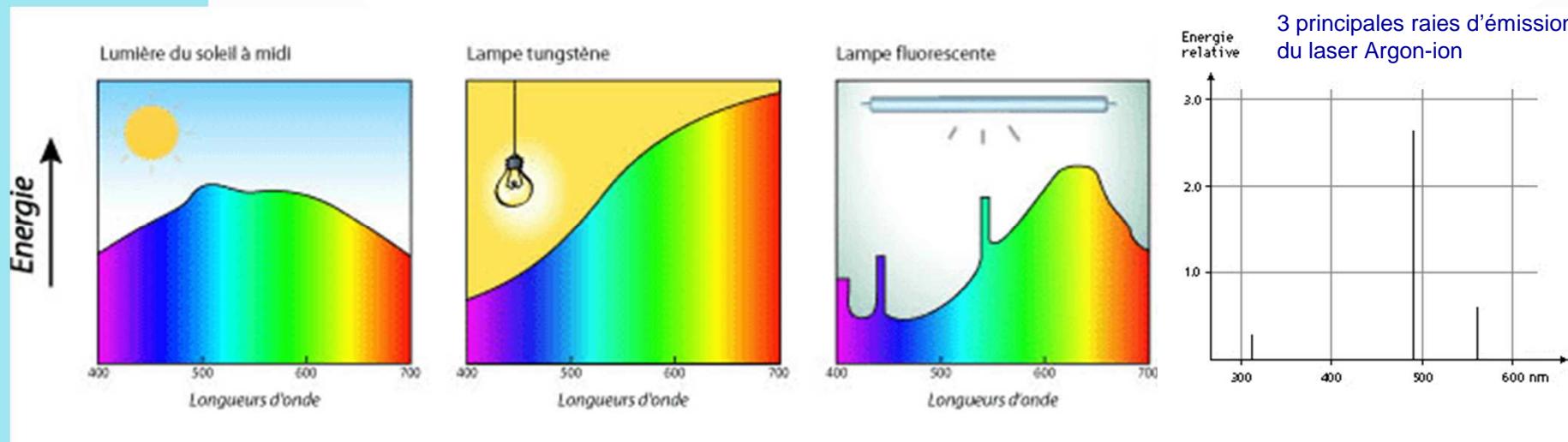
- La source de lumière
- L'objet coloré
- L'observateur



3 notions complémentaires

- La source de lumière

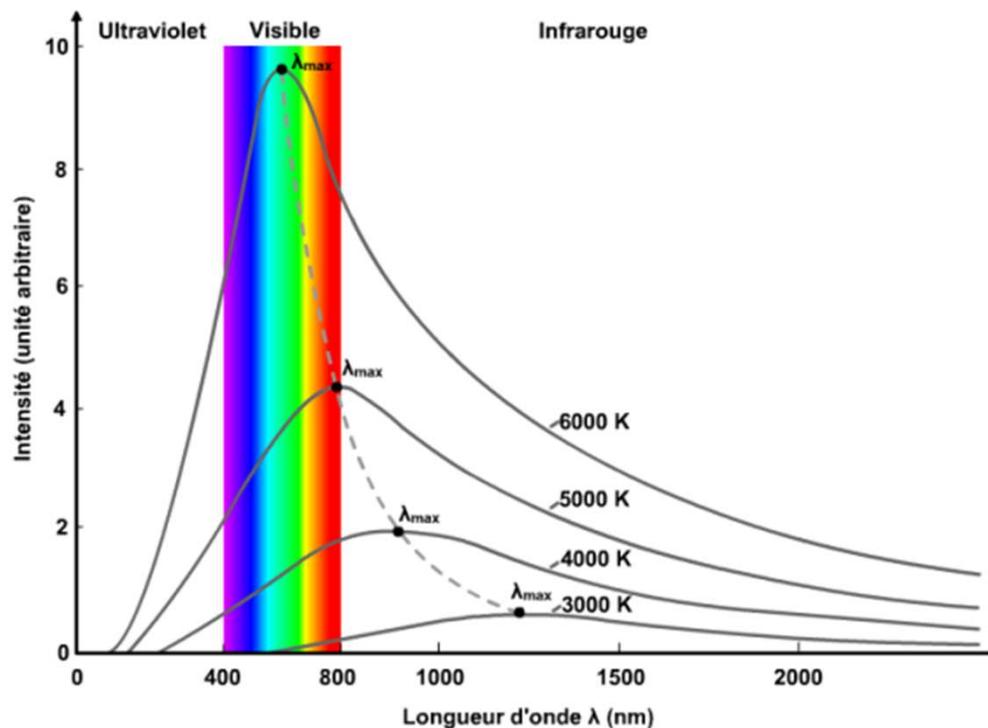
- caractérisée par la répartition spectrale d'énergie = spectre = flux énergétique émis par intervalle de λ (mesurée par des spectromètres)



- il existe différents types de spectres :
 - continu : sources thermiques (ampoules à incandescence, soleil, bougie...)
 - discontinu : sources utilisant une décharge électrique dans un gaz ionisé
 - combiné : tubes fluorescents
 - source monochromatique, raie : laser...

3 notions complémentaires

- La source de lumière : rappel
 - Max Planck : le spectre lumineux émis par un corps noir parfait, totalement absorbant dépend uniquement de sa température.



Exemples de spectres de corps noir (diagramme de l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde)

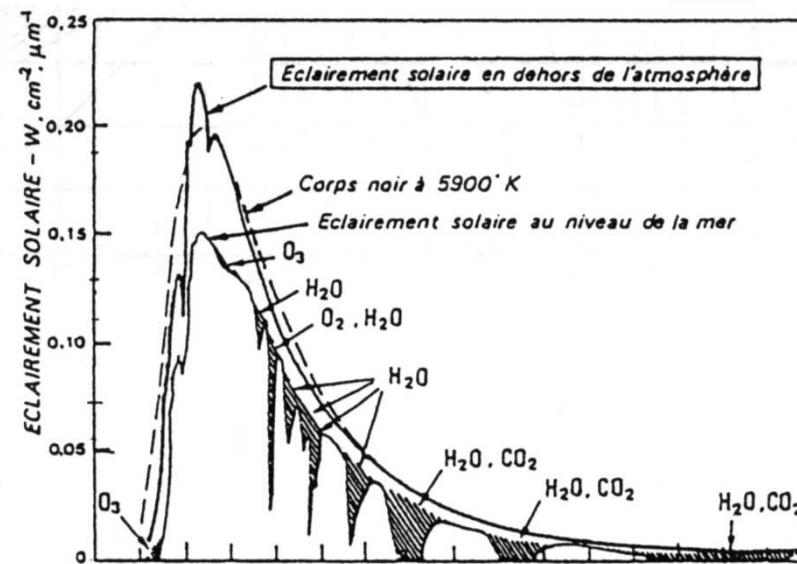
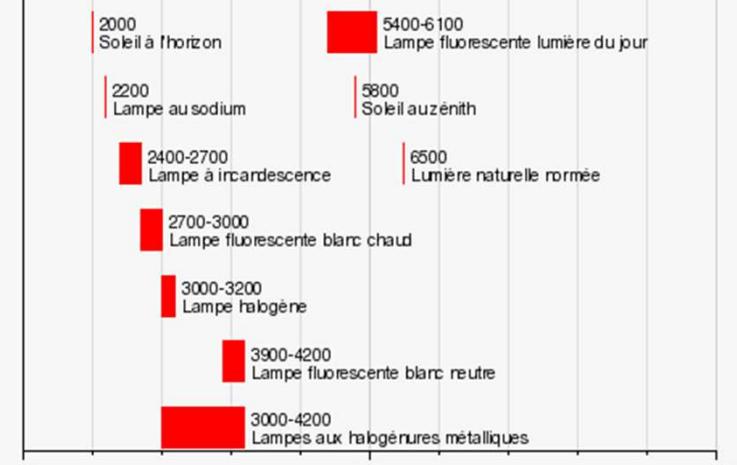
<http://h0.web.u-psud.fr/projetsdephysiquestatistique/images/spectre.png>

3 notions complémentaires

- La source de lumière

- notion de **température de couleur Tc** : la composition spectrale de la lumière émise par un corps réel porté à une température suffisamment élevée T est souvent comparable, dans les limites du spectre visible, à celle d'un corps noir qui serait porté à une certaine température Tc
- \Rightarrow température du corps noir qui émet un rayonnement ayant la même chromaticité que le rayonnement considéré

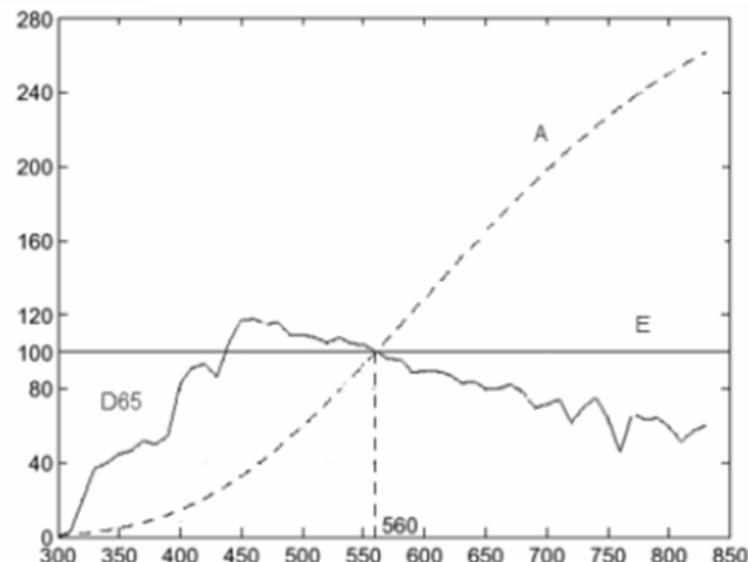
Exemples de températures de couleur en Kelvin



Comparaison de l'éclairement du corps noir à 5900K avec celui du soleil

3 notions complémentaires

- La source de lumière
 - sources normalisées par la CIE = illuminants



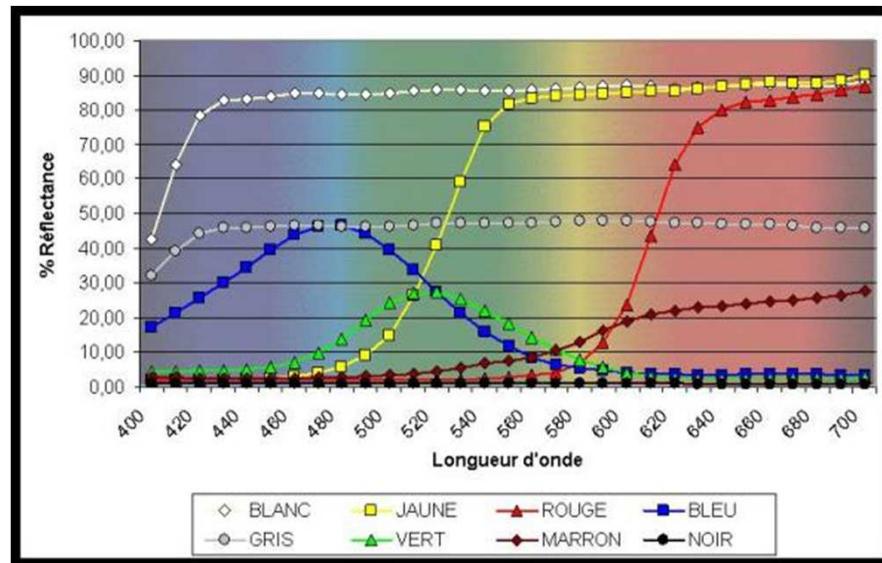
- Illuminant A : lampe à filament de tungstène de 500w ($T = 2856K$)
- Illuminant D65 : moyenne des lumières pendant la journée ($T = 6500K$)
- Illuminant E : lumière d'égale énergie ou source équi-énergétique

.....

Répartition spectrale d'énergie (normalisée à $\lambda = 560\text{nm}$)
de quelques illuminants standards de la CIE

3 notions complémentaires

- L'objet coloré \Rightarrow caractérisé par son spectre de réflectance (ou de transmittance)



- On appelle stimulus $S(\lambda)$ le signal résultant du produit du spectre d'une source $I(\lambda)$ avec le spectre de réflectance d'un objet $R(\lambda)$

$$S(\lambda) = I(\lambda) \times R(\lambda)$$

3 notions complémentaires

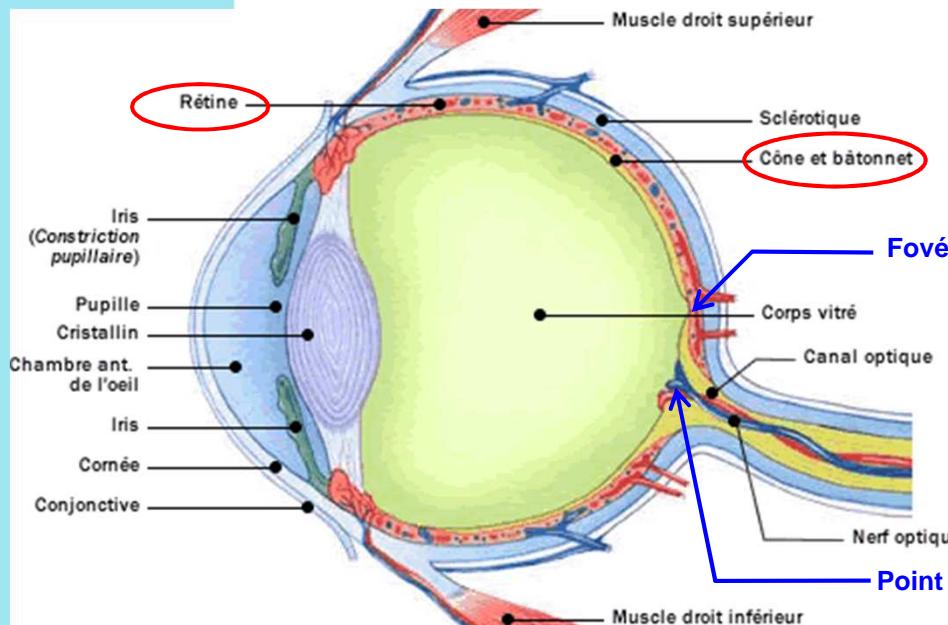
- L'observateur : œil, capteur CCD, pellicule photo ...
- Aspect spectral : courbe de sensibilité $f(\lambda)$
- C est la réponse de l'observateur :

$$C = \int_{\lambda=\lambda_{\min}}^{\lambda=\lambda_{\max}} V(\lambda) \times I(\lambda) \times R(\lambda) d\lambda$$

- Métamérisme : 2 rayonnements C_1 et C_2 sont métamères s'ils produisent sur un observateur des sensations identiques
 $(C_1 \equiv C_2 \text{ mais } C_1(\lambda) \neq C_2(\lambda) \text{ pour une longueur d'onde } \lambda \text{ donnée car égalité intégrale})$

3 notions complémentaires

- L'observateur ⇒ œil



Zones particulières de la rétine :

- **tache jaune** ou **fovéa** : zone où la vision des détails est la plus précise; elle est située dans le prolongement de l'axe optique de l'œil et est principalement constituée de cônes
- **point aveugle** : zone d'insertion du nerf optique qui est insensible

Le parcours de la lumière incidente est le suivant :

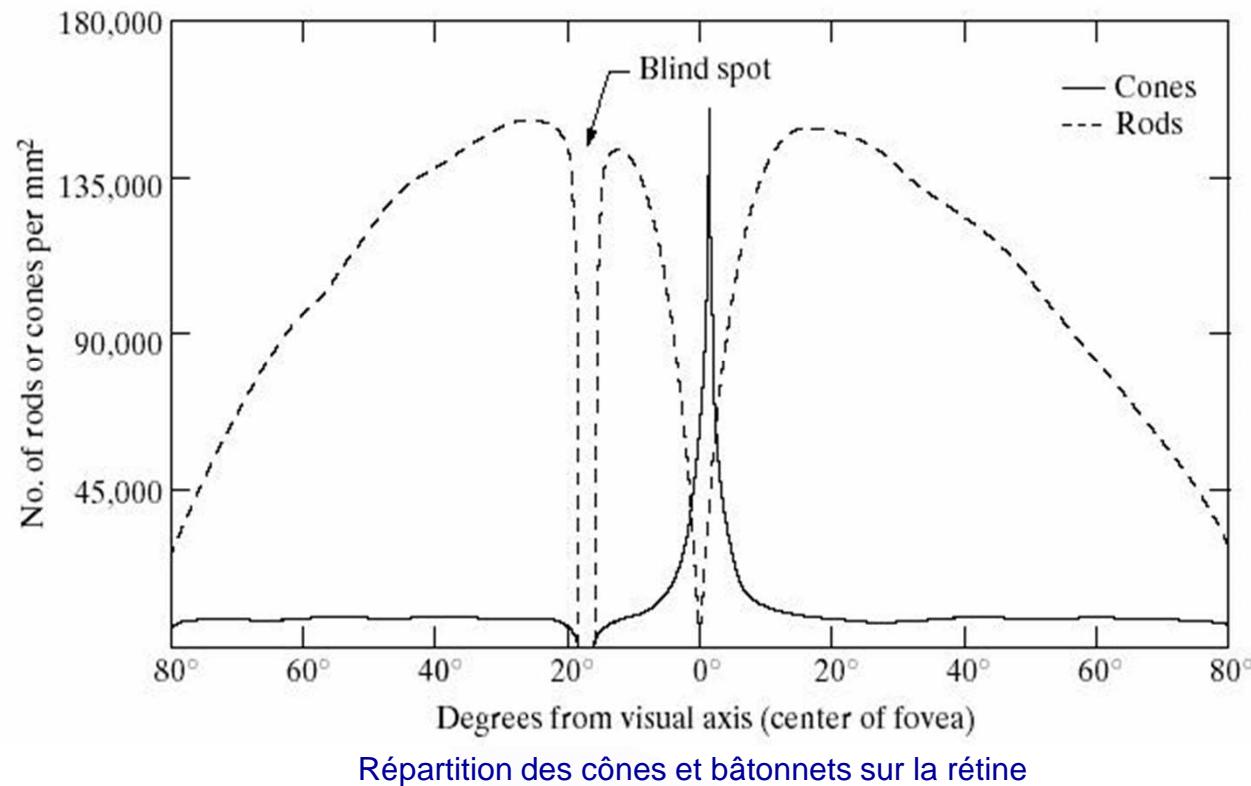
- Traversée de la **cornée** (transparente, résistante et qui remplace la sclérotique à l'avant) et de l'humeur aqueuse (de la **chambre antérieure de l'œil**) : 1^{ère} focalisation
- Passage de la **pupille** pour laquelle l'**iris** agit comme un diaphragme en réglant l'ouverture
- Le **cristallin** correspond à une lentille simple biconvexe (sa courbure peut varier et permet ainsi l'accommodation)
- L'image inversée se forme sur la **rétine**, partie photosensible qui contient les cônes et les bâtonnets.

Le système visuel humain

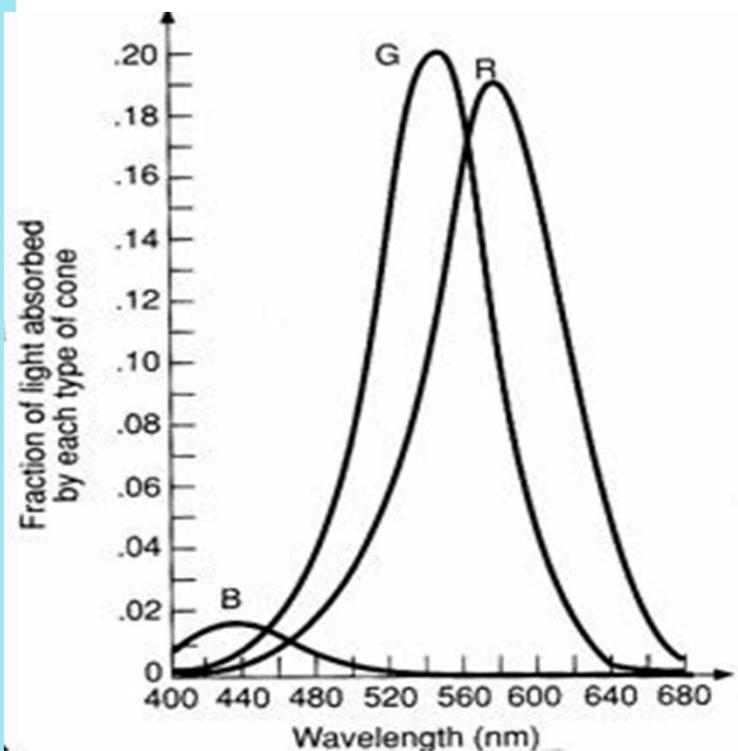
- Les cellules sensorielles (photorécepteurs) de la vue :
 - Bâtonnets :
 - ≈100 millions
 - Répartis sur la vaste zone périphérique de la rétine extérieure à la fovéa : responsables de la vision périphérique (perception de plus faible résolution et sensibilité au mouvement)
 - Sensibles aux variations de luminance (N&B)
 - Sensibles aux très faibles éclairements : responsables de la vision nocturne ou scotopique
 - Cônes :
 - 4-7 millions
 - Répartis sur la fovéa : responsables de la vision centrale de meilleure résolution
 - Spécialisés dans la vision des couleurs : 3 types de cônes → notion de trivariance
 - Cônes S (short) : réponse max dans les teintes bleues à 440nm
 - Cônes M (medium) : réponse max dans les teintes vertes à 545nm
 - Cônes L (long) : réponse max dans les teintes rouges à 580nm
 - Moins sensibles que les bâtonnets : vision photopique

Le système visuel humain

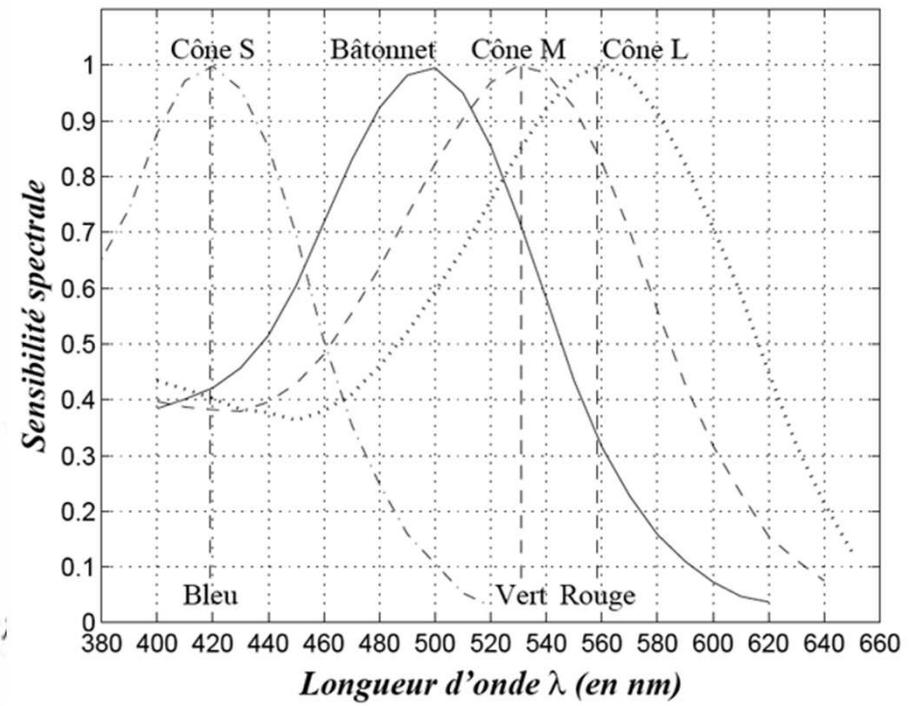
- Les cellules sensorielles (photorécepteurs) de la vue :
 - Répartition des bâtonnets et Cônes :



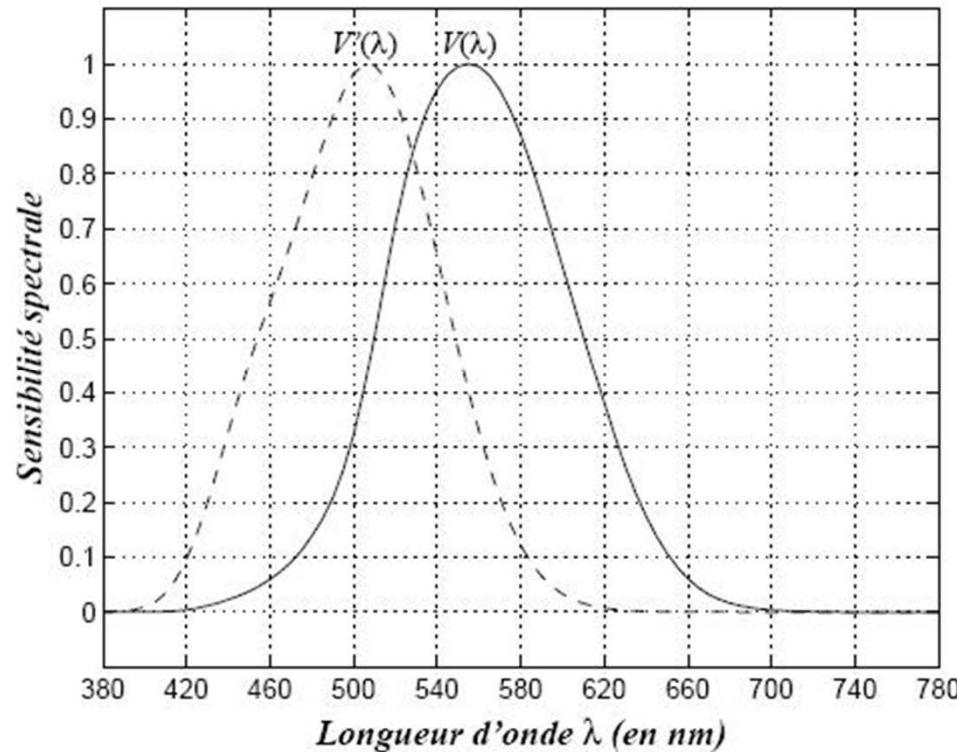
Propriétés des bâtonnets et des cônes



(a)
Sensibilité spectrale des différents cônes non normalisée (a) et normalisée (b)



Sensibilité spectrale de l'oeil

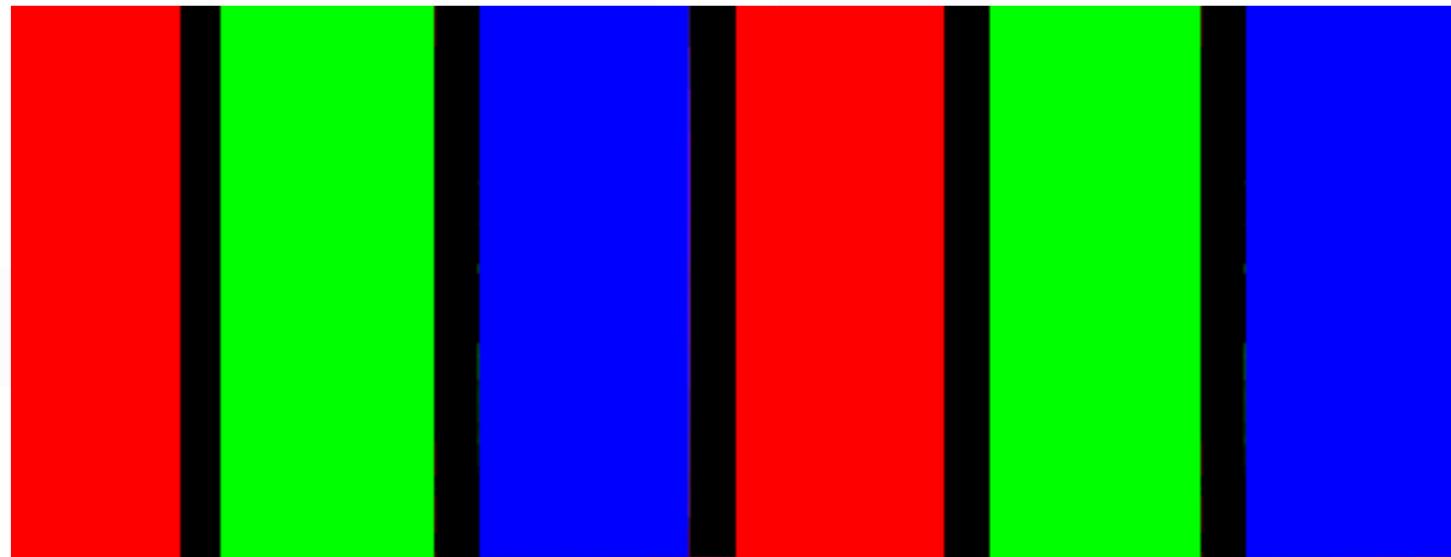


Fonctions d'efficacité lumineuse normalisée (luminance) en vision photopique ou scotopique

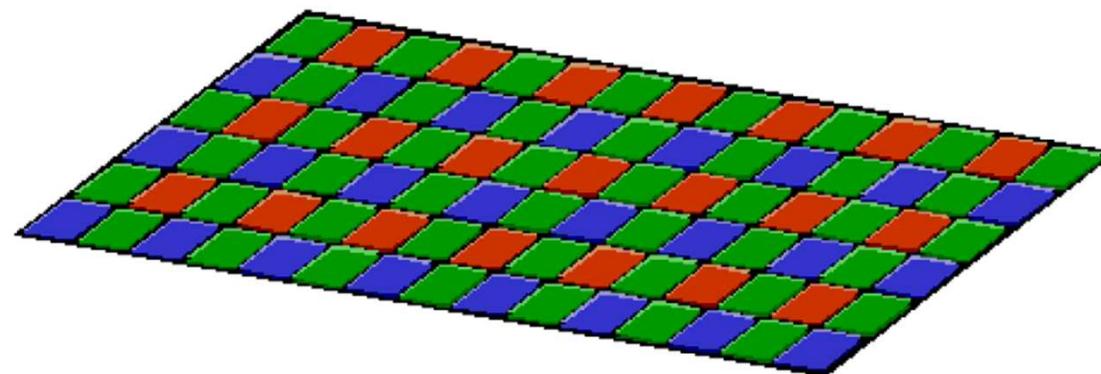
- $V(\lambda)$ vision photopique (diurne)
- - - $V'(\lambda)$ vision scotopique (nocturne)

La sensibilité est maximale pour le vert-jaune (555nm) en vision photopique

Sensibilité spectrale de l'oeil



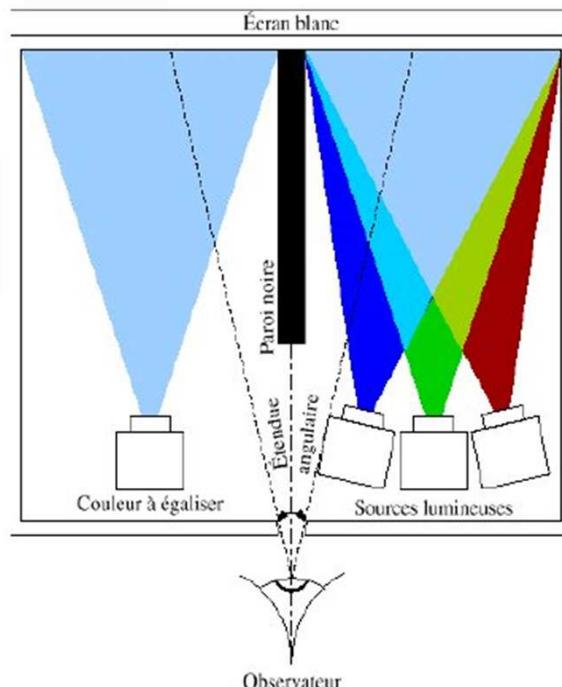
Pour une même quantité d'énergie émise dans différentes longueurs d'ondes,
le vert nous paraît plus lumineux



Disposition des filtres d'un capteur bayer

Théorie de la trichromie

- Postulat : n'importe quelle couleur monochromatique peut être reproduite à partir d'une combinaison de 3 couleurs monochromatiques
- Expériences d'égalisation (Grassman en 1853, Maxwell en 1860, puis Guild et Wright)



Expérience d'égalisation (appariement) entre un tri-stimulus de référence et le stimulus de test

$$C(\lambda) \equiv r(\lambda)R + g(\lambda)G + b(\lambda)B$$

$A \equiv B$ signifie « A est indifférenciable de B »

Par exemple :

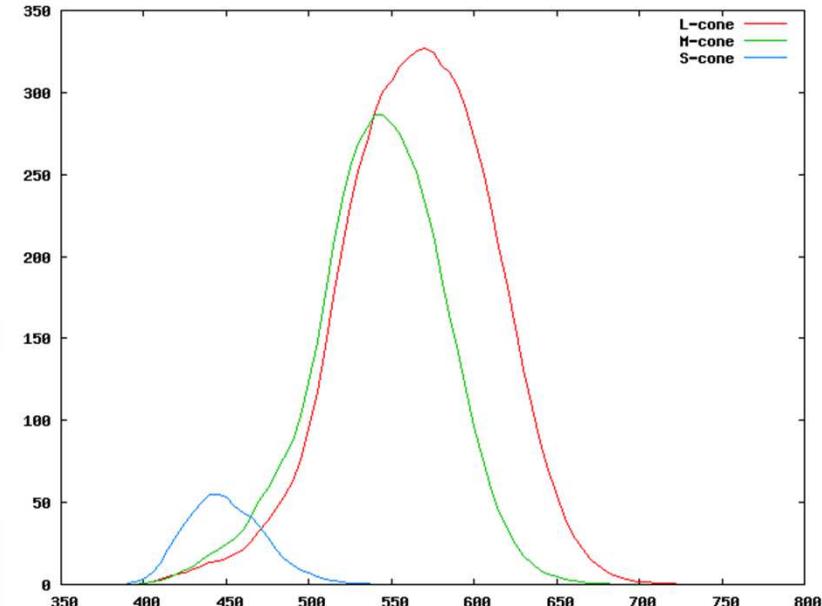
dans l'expérience de Wright, les primaires utilisées proviennent de monochromateur de longueurs d'onde 650, 530 et 460nm

dans l'expérience de Guild, les primaires utilisées proviennent de monochromateur de longueurs d'onde 630, 543 et 460nm

- # Théorie de la trichromie
- Les lois de Grassmann :
 - Toute lumière peut être recomposée à partir de 3 couleurs fondamentales
 - Les mélanges de couleurs forment une suite continue
 - Le résultat du mélange de lumières colorées ne dépend que de l'aspect de chacune des couleurs
 - 3 couleurs primaires fondamentales
 - permettant théoriquement de reproduire toutes les couleurs :
 - $C \equiv aC_1 + bC_2 + cC_3$ avec $a = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} V_1(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda \dots$
 - $C + aC_1 \equiv bC_2 + cC_3$ (notions de couleur négative)
 - ...
 - Spécifier une couleur = associer à son spectre de distribution un triplet de valeurs (a,b,c)

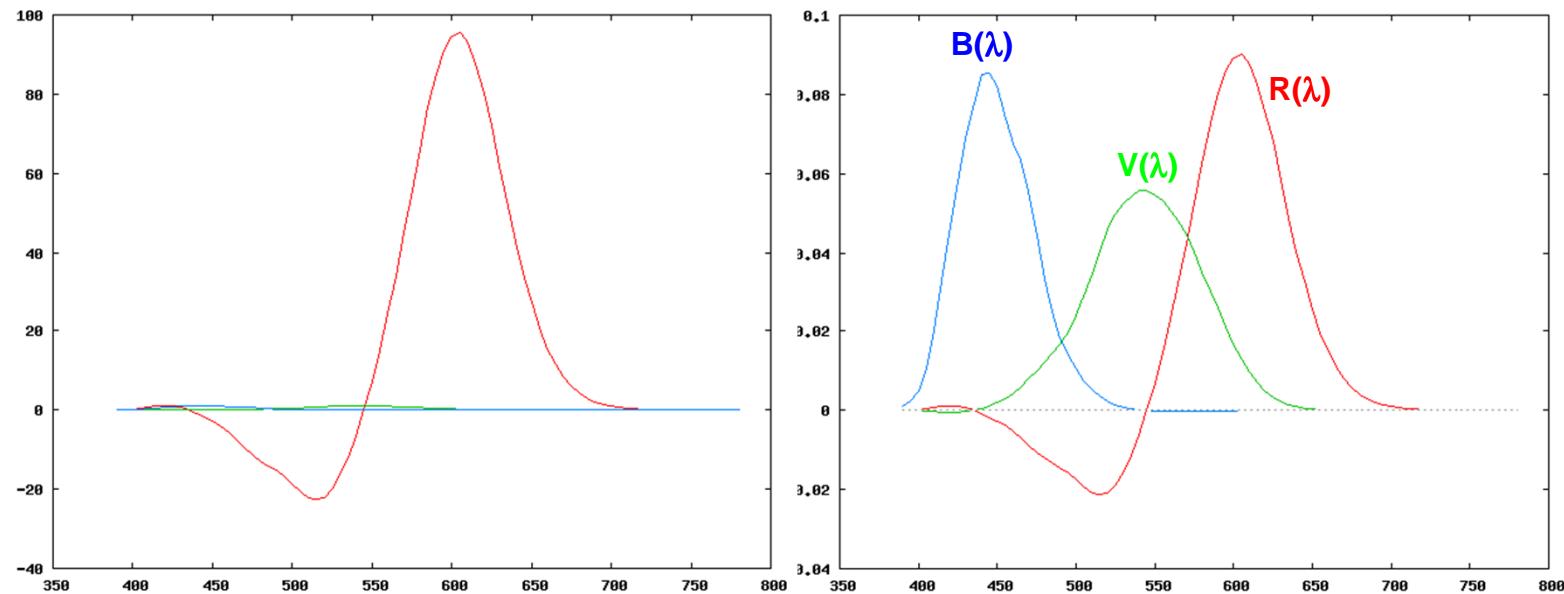
Système RGB CIE 1931

- Origine :
 - le choix des primaires n'est pas unique
 - elles sont choisies de façon à pouvoir égaliser le maximum de couleurs visibles
 - couleurs situées au centre et aux extrémités du spectre visible
- **RGB CIE 1931**, basé sur les trois primaires monochromatiques :
 - $\lambda_R = 700 \text{ nm}$
 - $\lambda_V = 546,1 \text{ nm}$
 - $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$



Excitation des cônes en fonction de l'énergie reçue
(#sensibilité)

Système RGB CIE 1931



Fonctions colorimétriques ou composante trichromatiques spectrales **non** normalisées et normalisées du système de primaires RGB CIE 1931. Ces courbes sont vérifiées pour 90% des observateurs

Pour un stimulus $S=I.R$, on calcule les composantes R, G, B par les formules :

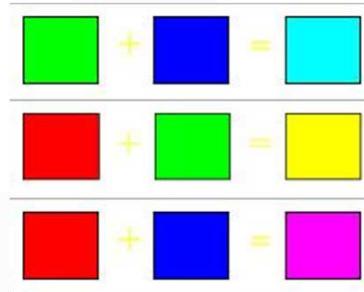
$$\begin{cases} R = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(\lambda) S(\lambda) d\lambda \\ G = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} G(\lambda) S(\lambda) d\lambda \\ B = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} B(\lambda) S(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

La fonction d'efficacité lumineuse normalisée en vision photopique $V(\lambda)$ s'écrit :

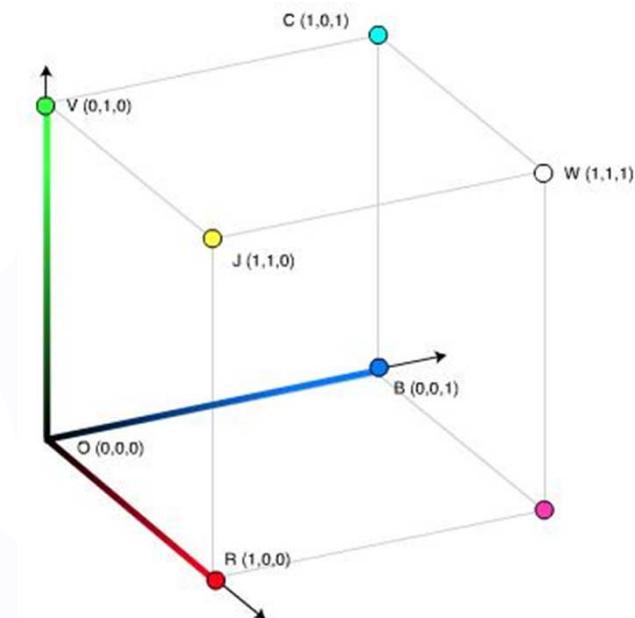
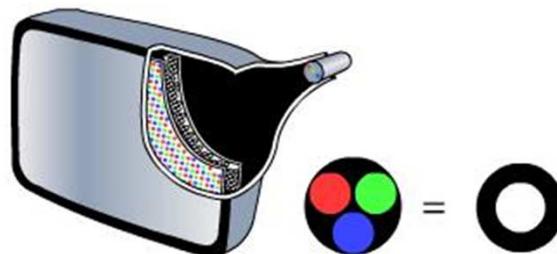
$$V(\lambda) = 1,0000R(\lambda) + 4.5907G(\lambda) + 0.0601B(\lambda)$$

Modèle colorimétrique RVB (ou RGB)

- Adapté à la manipulation des couleurs lumière : écrans, projecteurs ...
- Basé sur synthèse additive
- Couleurs complémentaires : Cyan, Magenta, Jaune

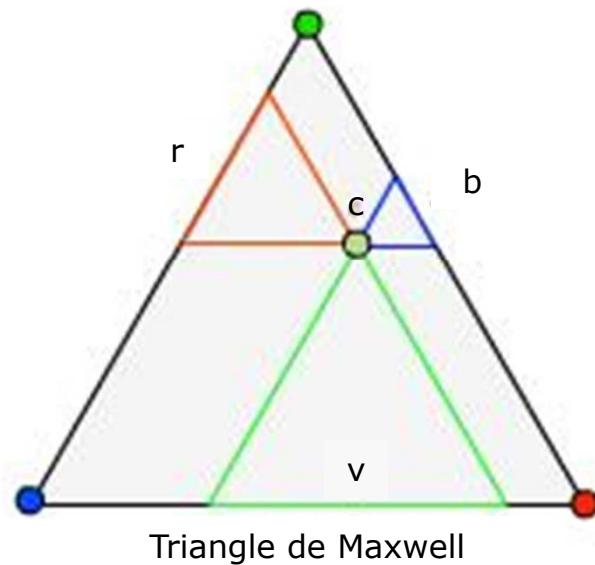
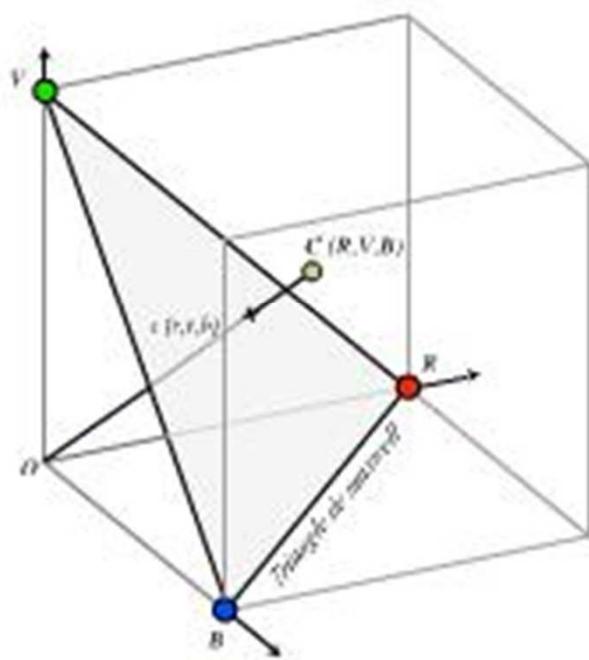


$$\text{Red} + \text{Green} + \text{Blue} = \text{White}$$



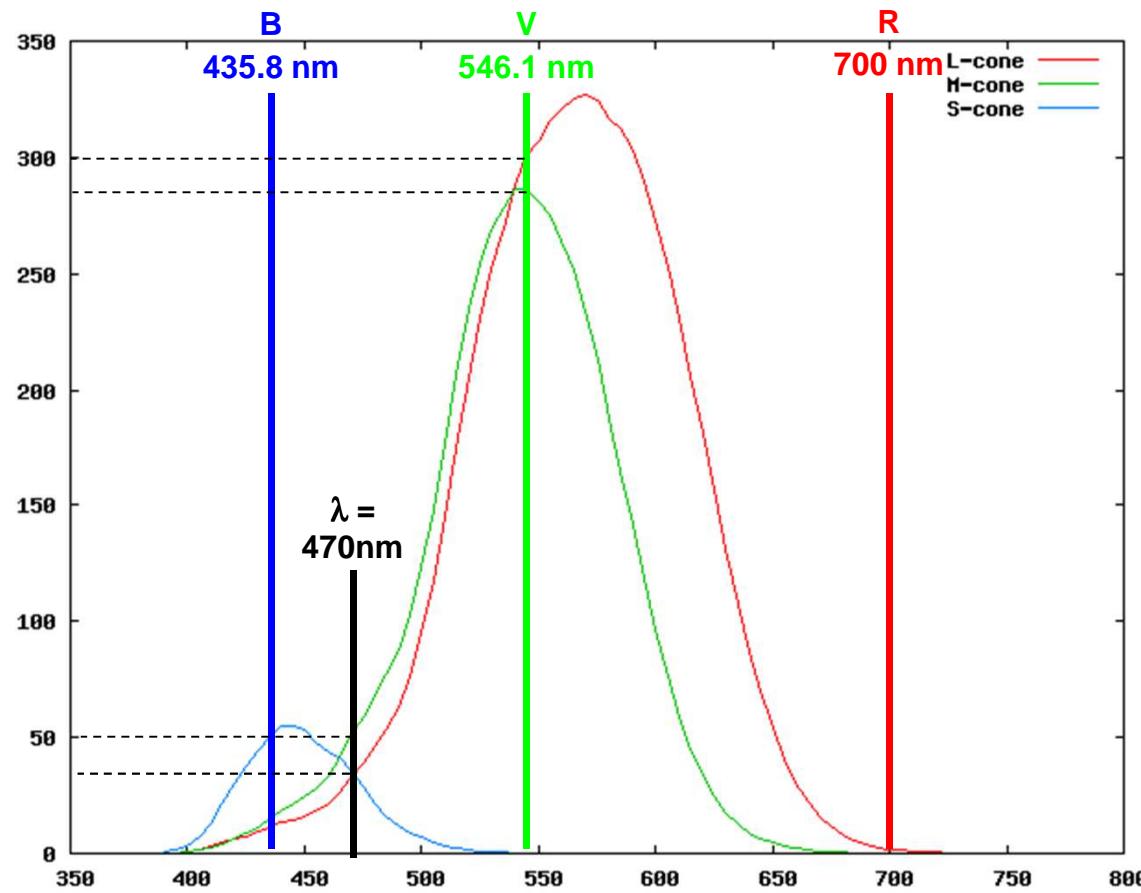
Modèle colorimétrique RVB

- Triangle de Maxwell
 - Notions de chrominance et de luminance
 - Toutes les couleurs situées dans le triangle de Maxwell ont la même valeur de luminance



Système (X,Y,Z) CIE 1931

- Défauts du système RGB CIE 1931 :
 - composante $R(\lambda)$ négative
 - il existe des couleurs non reproductibles : ex à $\lambda = 470\text{nm}$



Système (X,Y,Z) CIE 1931

- Défauts du système RGB CIE 1931 :
 - composante R(λ) négative
 - il existe des couleurs non reproductibles

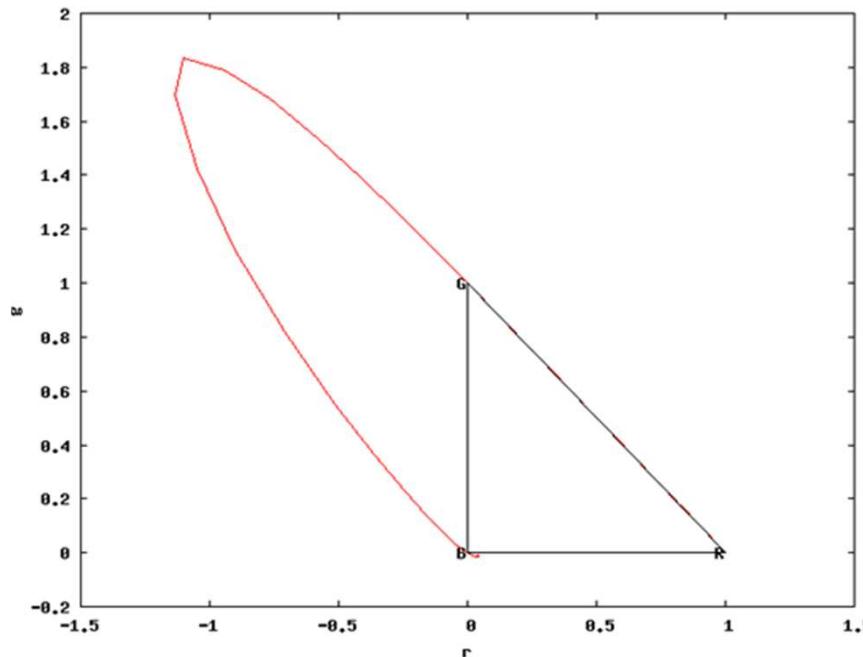


Illustration de la composante négative du rouge : le triangle RGB représente l'ensemble des couleurs accessibles dans le modèle RGB CIE1931. L'ellipse rouge représente l'ensemble des couleurs visibles par l'œil humain.

en abscisse, on a $r = \frac{R}{R + G + B}$

en ordonnée, on a $g = \frac{G}{R + G + B}$

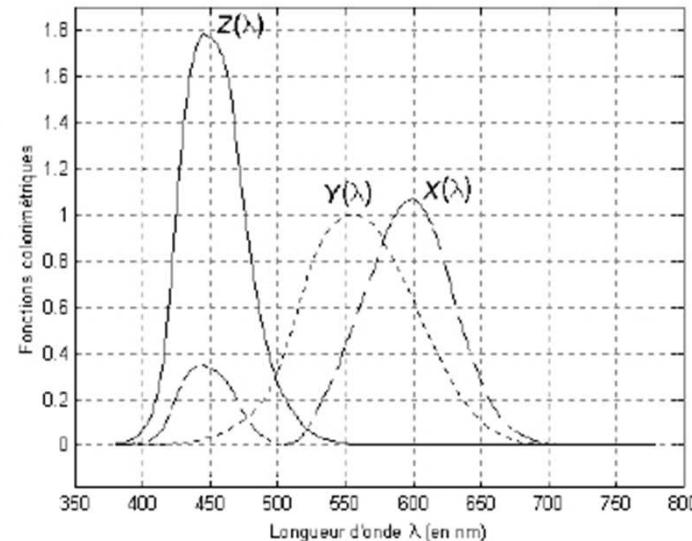
Système (X,Y,Z) CIE 1931

- Caractéristiques :

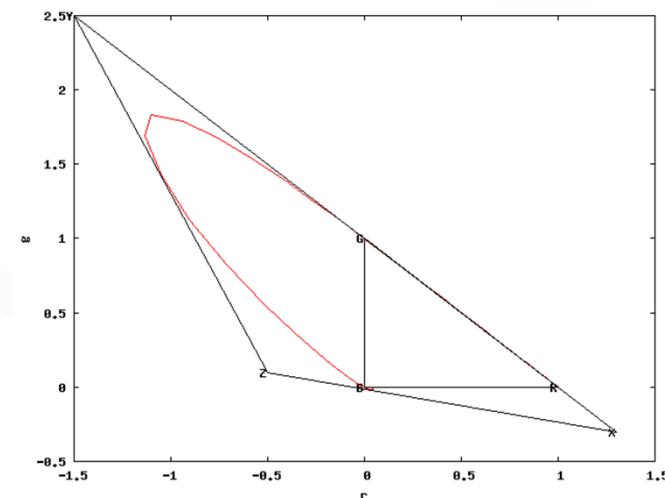
- primaires virtuelles
- obtenu par combinaison linéaire du CIE RGB
- ce système est construit tel que :
 - $Y(\lambda)$ = sensibilité de l'oeil humain à la luminance
 - Les fonctions colorimétriques sont positives

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{5.6508} \begin{bmatrix} 2.7690 & 1.7518 & 1.1300 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.00 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Passage RGB CIE 1931 à XYZ CIE 1931



Fonctions colorimétriques normalisées du système de primaires XYZ CIE 1931



Représentation des primaires RGB et XYZ, de l'ellipse des couleurs visibles dans le repère (r,g)

Diagramme de chromaticité

- Objectif : séparer luminance et chromaticité :
 - on introduit les composantes (x,y,z) :
 - $x = X/(X+Y+Z)$
 - $y = Y/(X+Y+Z)$
 - $z = Z/(X+Y+Z)$
 - $x + y + z = 1$
- Système colorimétrique xyY
- on peut représenter la chromaticité par (x,y)

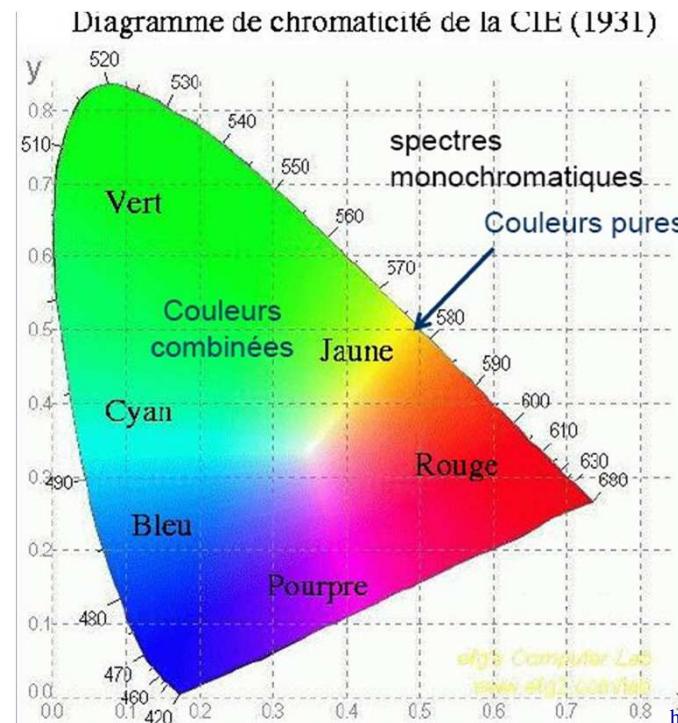


Diagramme de chromaticité

- Intérêt : manipulation plus aisée des couleurs
 - permet de situer les couleurs les unes par rapport aux autres
 - permet d'effectuer des opérations sur les couleurs :
 - couleur complémentaire
 - longueur d'onde dominante
 - mélange de deux couleurs
 - etc...

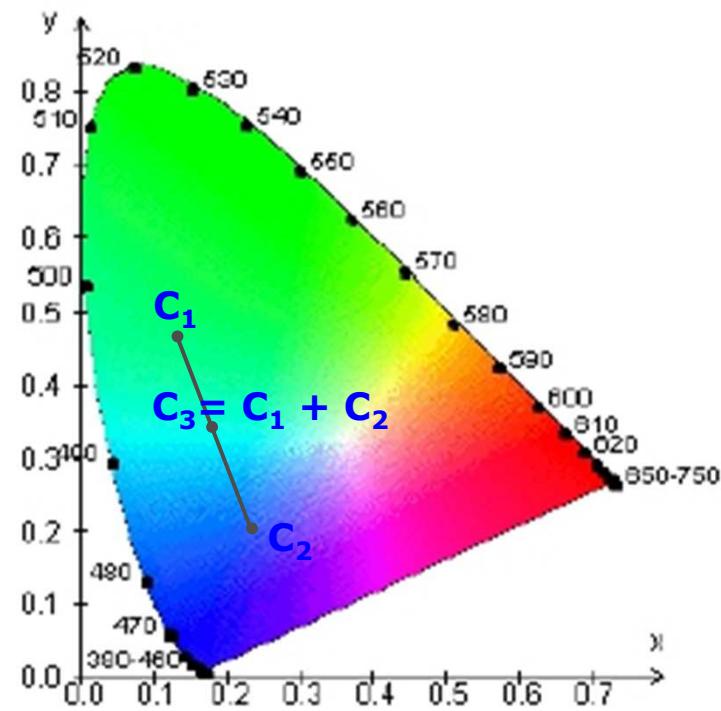
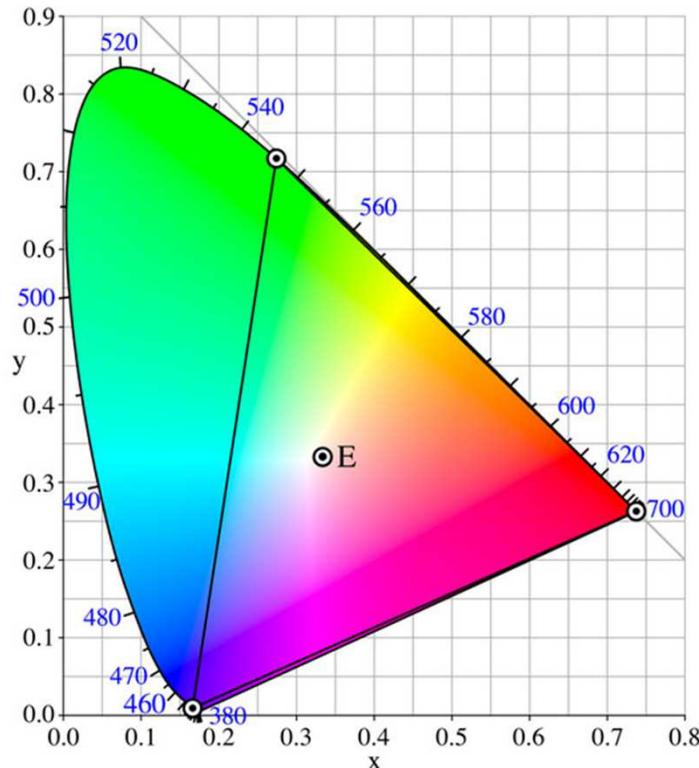


Diagramme de chromaticité

- Notion de **Gamut** : partie de l'espace de couleur que peut reproduire un système colorimétrique ou un dispositif



Les sommets du triangle correspondent aux primaires utilisées.

Ici, il s'agit des primaires du CIE RGB 1931

Autres systèmes colorimétriques

- Un système colorimétrique est toujours défini relativement au modèle Yxy ou au modèle XYZ
- Il est défini par :
 - la matrice de passage du système XYZ (ou Yxy) au système considéré
ou
 - les composantes des primaires dans le modèle Yxy, ainsi que la valeur du "point blanc", c'est à dire du point de coordonnée [1,1,1]
- RGB CIE Rec709, Adobe RGB...

Autres systèmes colorimétriques

- Système colorimétrique RGB CIE Rec709 :

$$\begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

ou

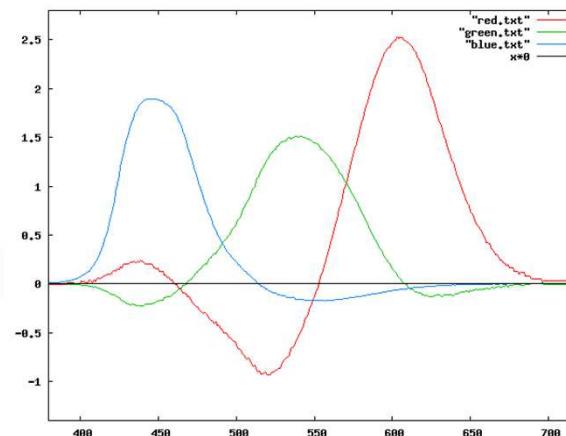
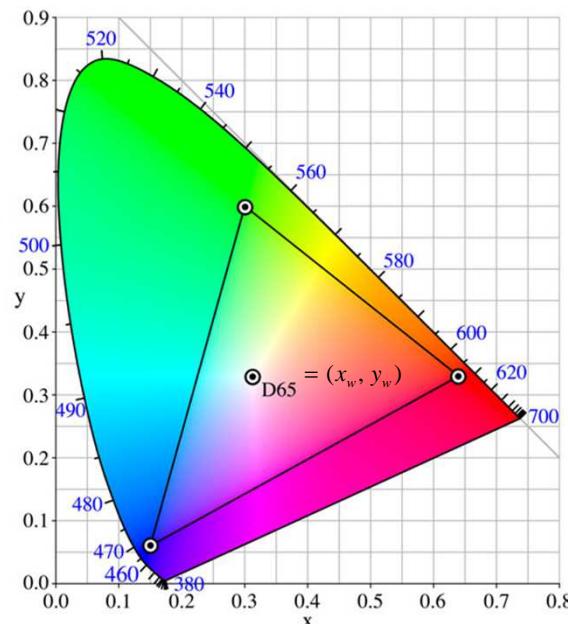
$$(x_{r-rec709}, y_{r-rec709}) = (0.64, 0.33)$$

$$(x_{g-rec709}, y_{g-rec709}) = (0.30, 0.60)$$

$$(x_{b-rec709}, y_{b-rec709}) = (0.15, 0.06)$$

$$(x_w, y_w) = (0.3127, 0.3290)$$

- Système à la base du sRGB, créé par HP et Microsoft pour les écrans, Internet



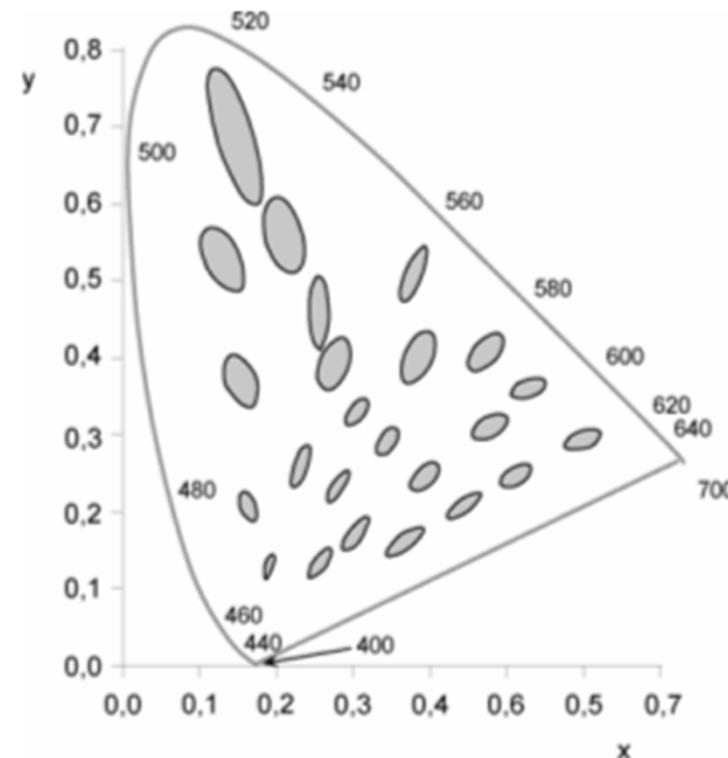
Courbes colorimétriques du système RGB Rec709
(obtenues avec les courbes colorimétriques de XYZ et la matrice de passage XYZ-> RGB)

Autres systèmes colorimétriques

- Systèmes perceptuellement uniformes
 - l'espace XYZ n'est pas uniforme : la distance entre deux couleurs du diagramme de chromaticité xy n'est pas perçu de la même façon que le système visuel humain

Ellipses de Mac Adam :
chaque ellipse représente
la plus petite différence
perceptible entre 2
couleurs proches

➤ création du système Lab



Autres systèmes colorimétriques

- **luminance** = l'intensité lumineuse réelle d'une source de lumière ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)
 - Caractérise l'émission d'une source dans une direction particulière

$$V(\lambda) = 1,0000R(\lambda) + 4.5907G(\lambda) + 0.0601B(\lambda)$$

- **luminosité** = interprétation de cette luminance par la vision humaine (lié au fonctionnement perceptif)
- Loi de Weber-Fechner : la sensibilité de l'œil pour un niveau de luminance donné vérifie :

$$dL / L = 0.01$$

La capacité de l'œil à distinguer deux niveaux différents dépend de la luminance courante et deux niveaux, pour être distincts, doivent différer de 1% au moins

Autres systèmes colorimétriques

- Système Cie 1976 L*a*b*

- pour couvrir l'intégralité du spectre visible par l'œil humain : système plus large : couleurs virtuelles
- système perceptuellement uniforme (ainsi que le système CIE 1976 (L*, u*, v*))
- L* = luminosité
- a* et b* = composantes chromatiques
- base du système de gestion de couleurs
- modèle non linéaire mais inversible

$$L^* = \begin{cases} 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \text{pour } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \\ 903.3 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right) & \text{sinon} \end{cases}$$

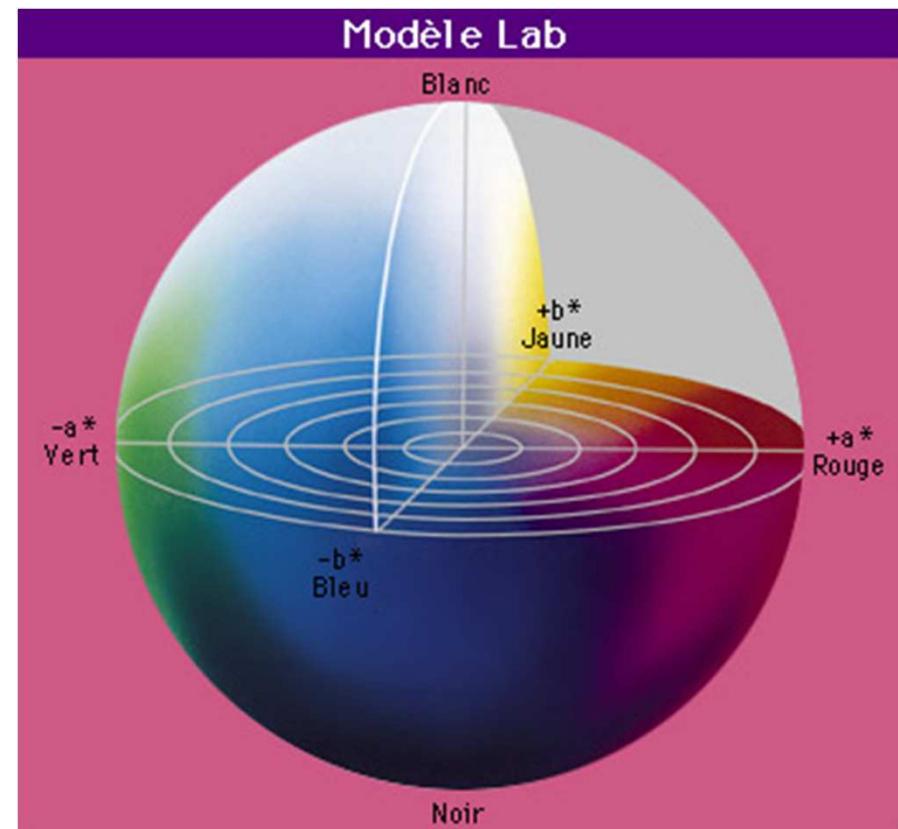
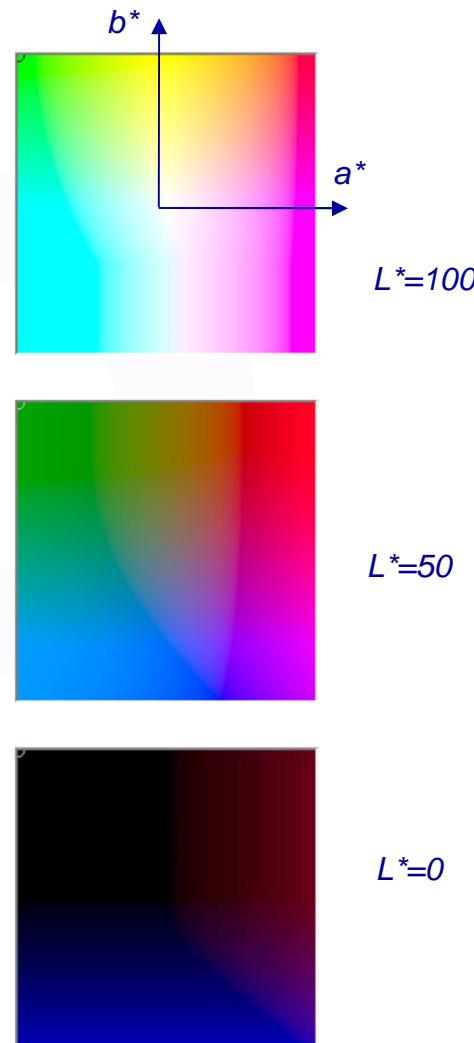
Avec Xn, Yn, Zn, valeurs maximales possibles : coordonnées du point blanc

$$\left. \begin{array}{l} a^* = 500 \cdot \left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right) \\ b^* = 200 \cdot \left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right) \end{array} \right\} \text{avec } \begin{cases} f(t) = t^{\frac{1}{3}}, \text{ pour } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \\ f(t) = 7.787t + 16 / 116, \text{ sinon} \end{cases}$$

Système CIE 1976 (L^* , a^* , b^*)

$$L^* \in [0,100]$$

$$a^* \in [-128,127] \quad b^* \in [-128,127]$$



Système CIE 1976 (L^* , a^* , b^*)

- Dans l'espace $L^*a^*b^*$, on peut représenter une couleur par ses coordonnées cylindriques :
 - angle de teinte h^* :
 - $h=0^\circ$ pour la teinte rouge et la direction $+a^*$;
 - $h=90^\circ$ pour la teinte jaune et la direction $+b^*$;
 - $h=180^\circ$ pour la teinte verte et la direction $-a^*$;
 - $h=270^\circ$ pour la teinte bleue et la direction $-b^*$
 - chroma C^* ou saturation s :
 - les lieux de même chroma $C a^* b^*$ sont des cercles concentriques centrés sur l'origine de coordonnées $a^*=b^*=0$ correspondant au stimulus blanc de référence
 - L^* également appelé clarté

Système CIE 1976 (L^* , a^* , b^*)

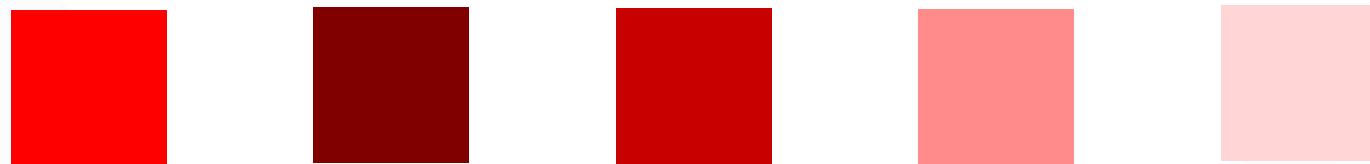
- On définit les distances entre paramètres :

	Symbole	CIE Lab
Angle de teinte h	h	$\text{Arctan}(b^*/a^*)$
Chroma	C^*	$\sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$
Écart d'angle de teinte	Δh	$h_1 - h_2$
Écart de chroma	ΔC^*	$C^*_1 - C^*_2$
Écart de saturation	Δs	$s_1 - s_2$
Écart de clarté	ΔL^*	$L^*_1 - L^*_2$
Différence de couleur	ΔE^*	$\sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$

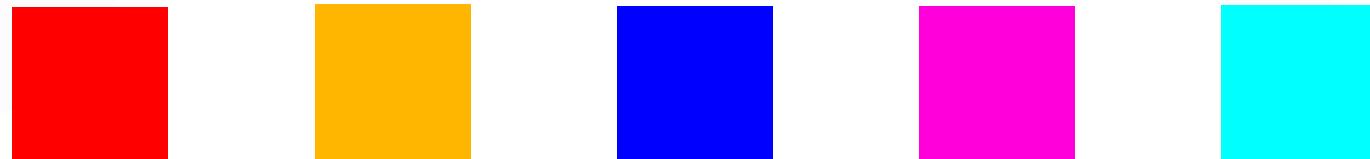
Autres espaces : système perceptuel

- ◆ Quelles sont les points communs entre les couleurs de chaque cas ?

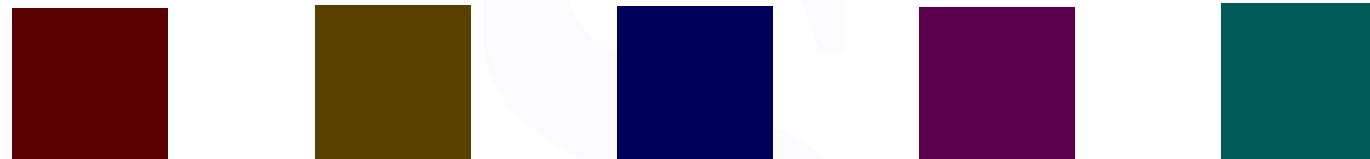
Cas 1



Cas 2

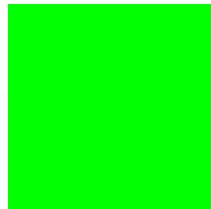


Cas 3



Système TSL

- Qualifier la couleur ci-dessous :

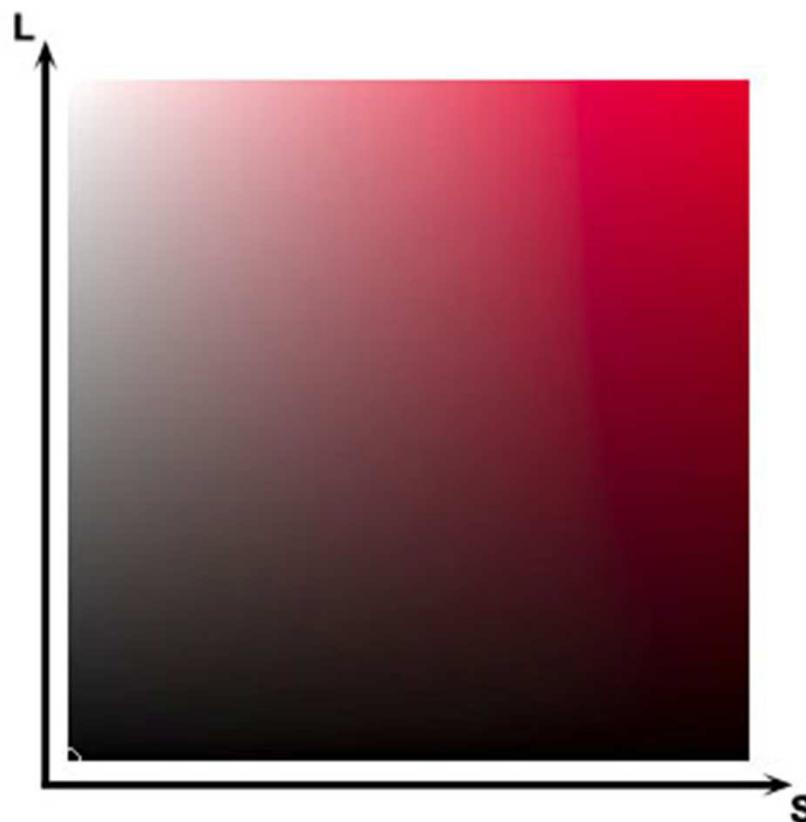


⇒ verte, claire, vive

- Système basé sur des notions intuitives :
 - **teinte** : dominante colorimétrique
 - **luminosité/intensité** : degré d'éclaircissement ou d'assombrissement
 - **saturation** : degré de « pureté » de la couleur (nul si gris)
- Plusieurs systèmes : TSL (teinte saturation luminosité, en anglais : HSV, HSL), ITS(intensité teinte saturation)...

Système TSL

- Variation de S et L si T est fixé



Système TSL

◆ Formules de passage R,G,B → T,S,L :

$$\left. \begin{array}{l} r, g, b \in [0,1] \\ \text{Max} = \text{Max}(r, g, b) \\ \text{Min} = \text{Min}(r, g, b) \end{array} \right\} \Rightarrow \quad \begin{cases} L = 100 \cdot \text{Max} \\ T = 60 \cdot (g-b)/(\text{Max}-\text{Min}) + 0 & \text{si Max} = r \text{ et } g \geq b \\ T = 60 \cdot (g-b)/(\text{Max}-\text{Min}) + 360 & \text{si Max} = r \text{ et } g < b \\ T = 60 \cdot (b-r)/(\text{Max}-\text{Min}) + 120 & \text{si Max} = g \\ T = 60 \cdot (r-g)/(\text{Max}-\text{Min}) + 240 & \text{si Max} = b \\ S = 0 \text{ si Max} = 0 \\ S = 100 \cdot (1 - \text{Min}/\text{Max}) \end{cases}$$

◆ Formules de passages R,G,B → ITS [GONZALES93] :

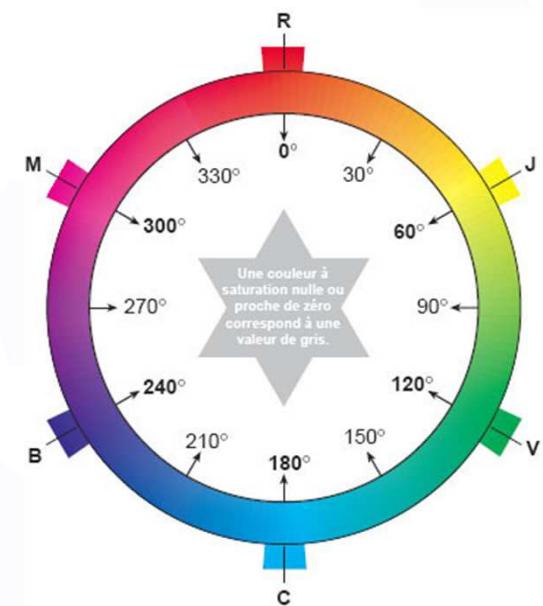
$$i = \frac{r + g + b}{3}$$

$$r, g, b \in [0,1] \Rightarrow \quad t = \begin{cases} \arccos\left(\frac{(r-g)+(r-b)}{2\sqrt{r^2+g^2+b^2-rg-gb-br}}\right), & \text{si } g \geq b \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{(r-g)+(r-b)}{2\sqrt{r^2+g^2+b^2-rg-gb-br}}\right), & \text{si } b \geq g \end{cases}$$

$$s = 1 - \frac{\min\{r, g, b\}}{i}$$

Système TSL

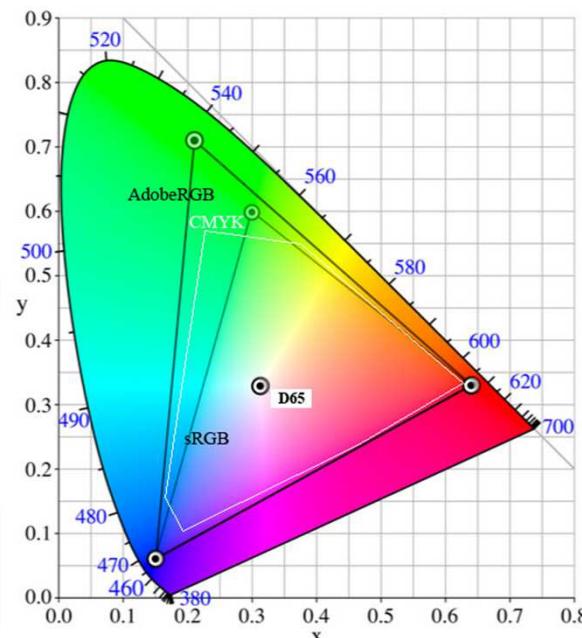
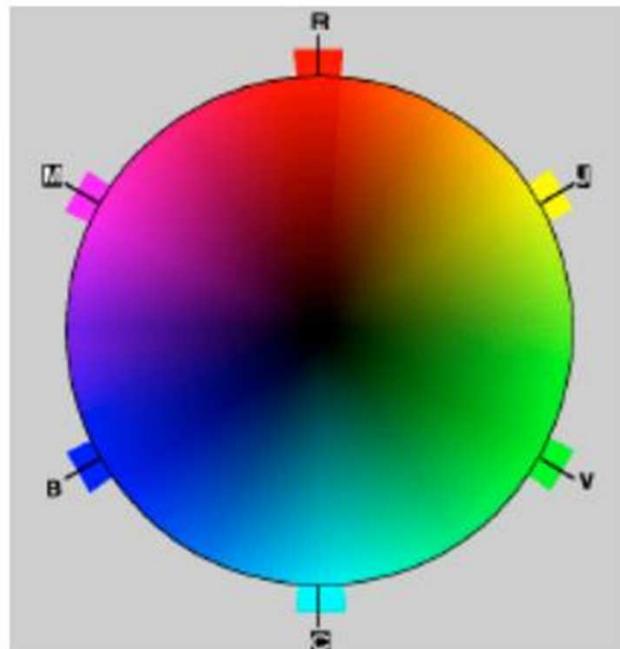
- ◆ Utilisation en imagerie aérienne : balance des couleurs



Autres systèmes colorimétriques

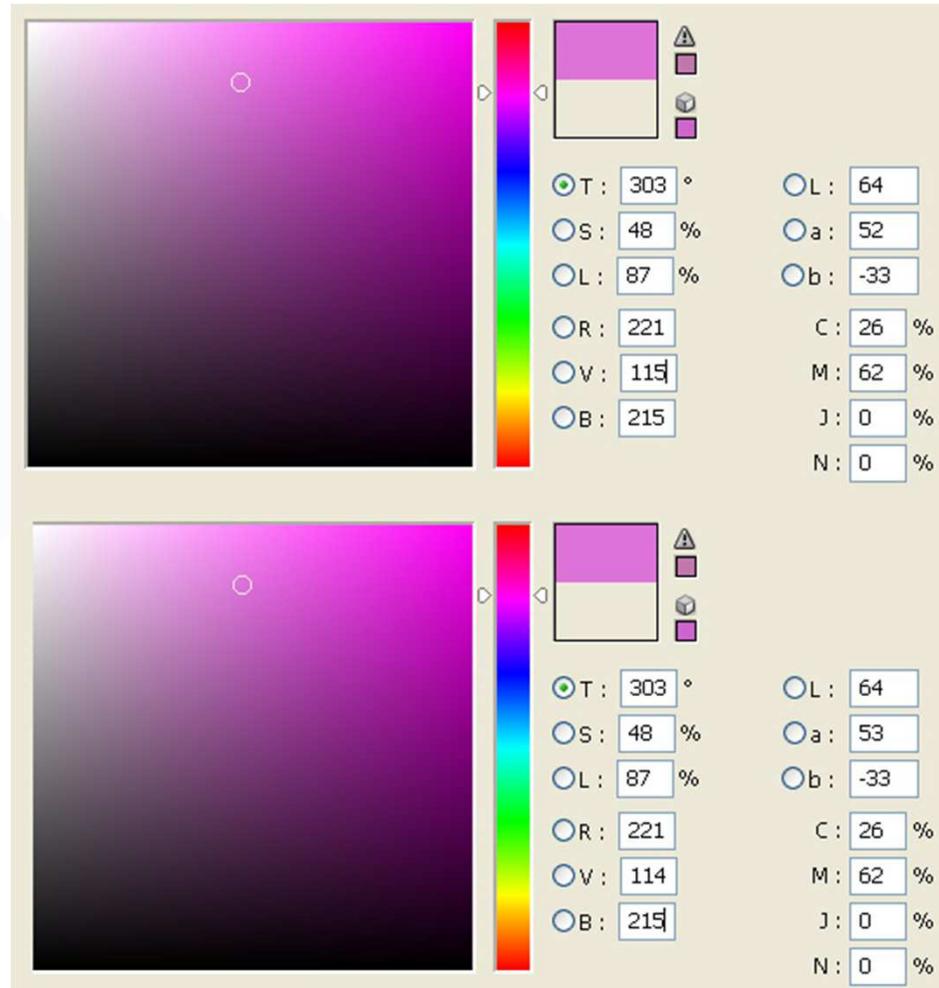
- Systèmes CMJN

- couleurs primaires : Cyan, Magenta, Jaune, Noir
- adapté à la manipulation des couleurs objets : impression
- basé sur synthèse soustractive
- couleurs secondaires : Rouge, Vert, Bleu
- noir pour compenser les défauts des encres



Remarque sur les gamuts

- CMJ ⊂ RVB ⊂ Lab



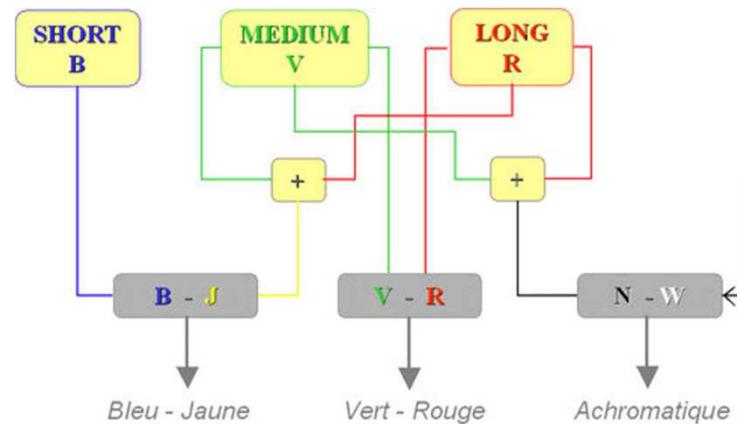
Autres systèmes colorimétriques

- Systèmes antagonistes et théorie des zones :
 - A l'intérieur de l'œil, la couche des cônes trichromatiques serait suivie d'une zone où les signaux LMS seraient transformés en signaux antagonistes selon un processus adapté à la luminance et 2 processus adaptés à la chrominance
- 1 luminance + 2 composantes chromatiques antagonistes
- Théorie proposée par Ewald Hering en 1874, confirmée en 1957 (Hurvitch et al.)

Systèmes antagonistes

- L'information couleur est structurée en 3 canaux :
 - Le canal **bleu-jaune** qui fournit une réponse antagoniste opposant les cônes S et la réponse additive issue des cônes M et L.
 - Le canal **vert-rouge** qui fournit une réponse antagoniste opposant les cônes L et les cônes M.
 - Le canal **achromatique** qui fournit une réponse additive issue de la sollicitation des cônes M et L représentant une information sur le niveau d'éclairement indépendamment de la composition spectrale du rayonnement reçu.

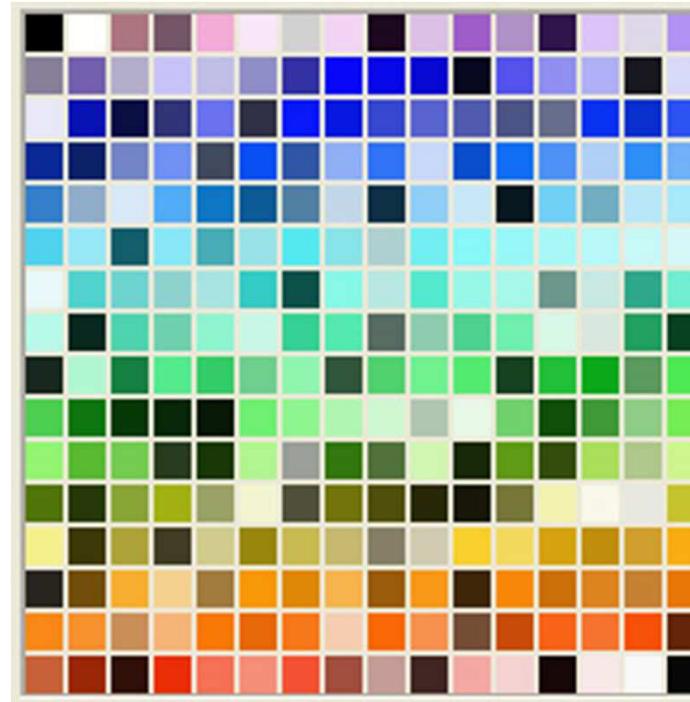
*Il n'y a pas de bleu jaunâtre,
ni de vert rougeâtre...*



- Exemples de systèmes antagonistes : AC1C2 (Frei-Faugeras, Krauskopf, Garbay, Ballard...)

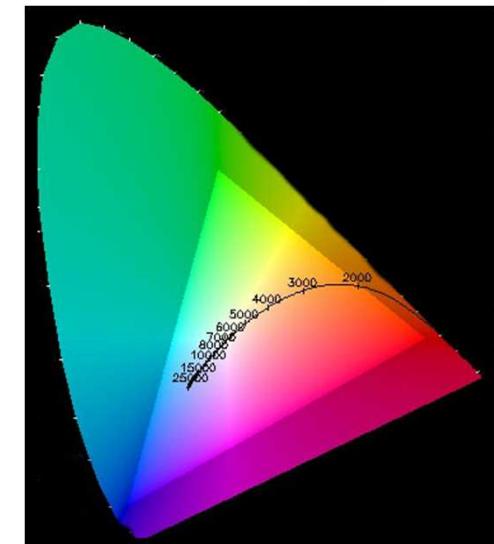
Autres systèmes colorimétriques

- ◆ Modèles à couleur indexées

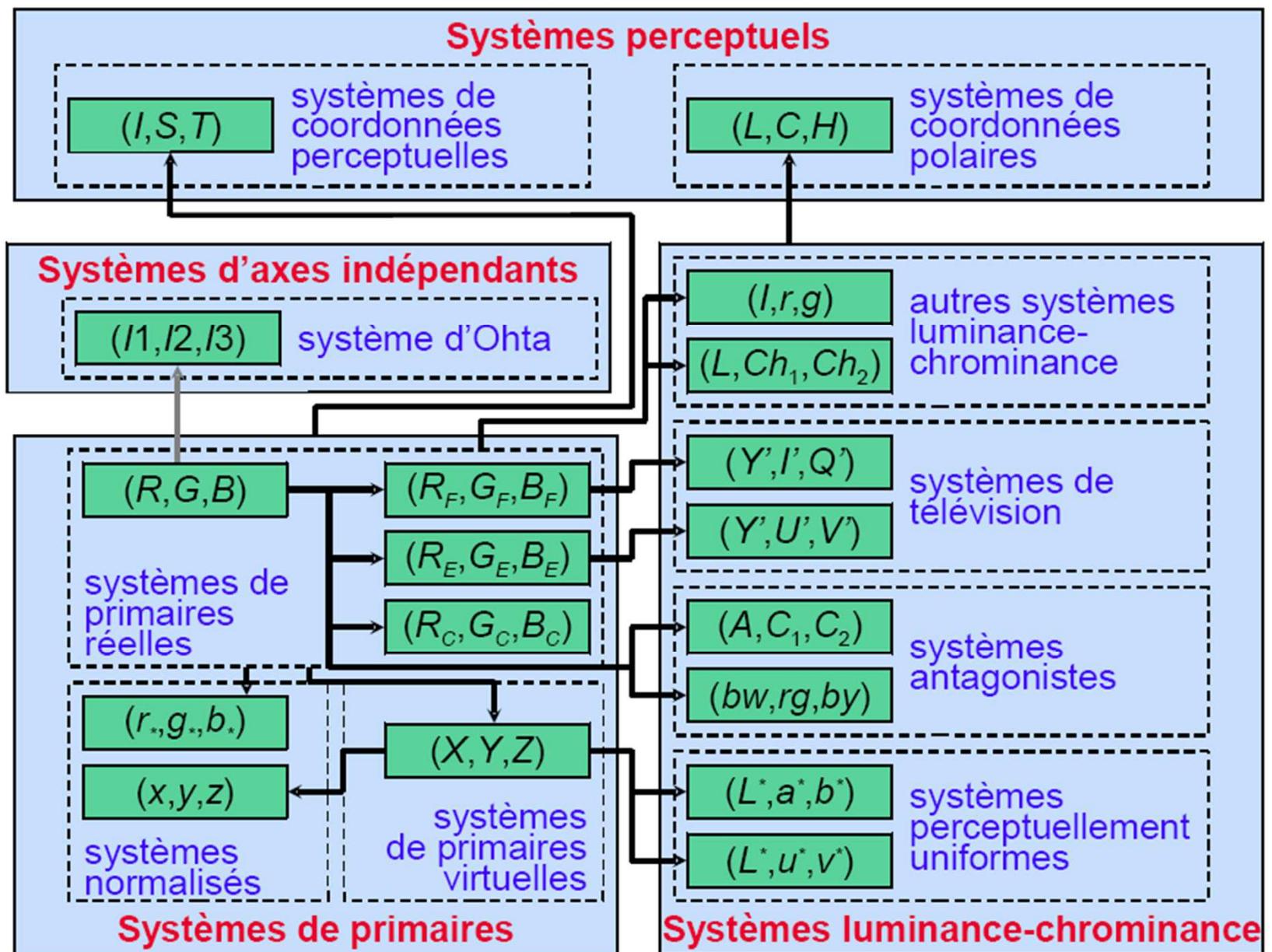


Remarques sur les illuminants

- Le système XYZ convient aux systèmes émissifs
- La majorité des objets photographiés réfléchissent la lumière incidente, il faut ajouter un illuminant => choix d'illuminants standard :
 - D50, D65, ... correspondant au corps noir à 5000 K, 6500 K. D65 est considéré comme représentant la lumière du jour
 - A : filament de tungstène à 2856 K
- Pour l'impression, il faut aussi tenir compte du support



Bilan

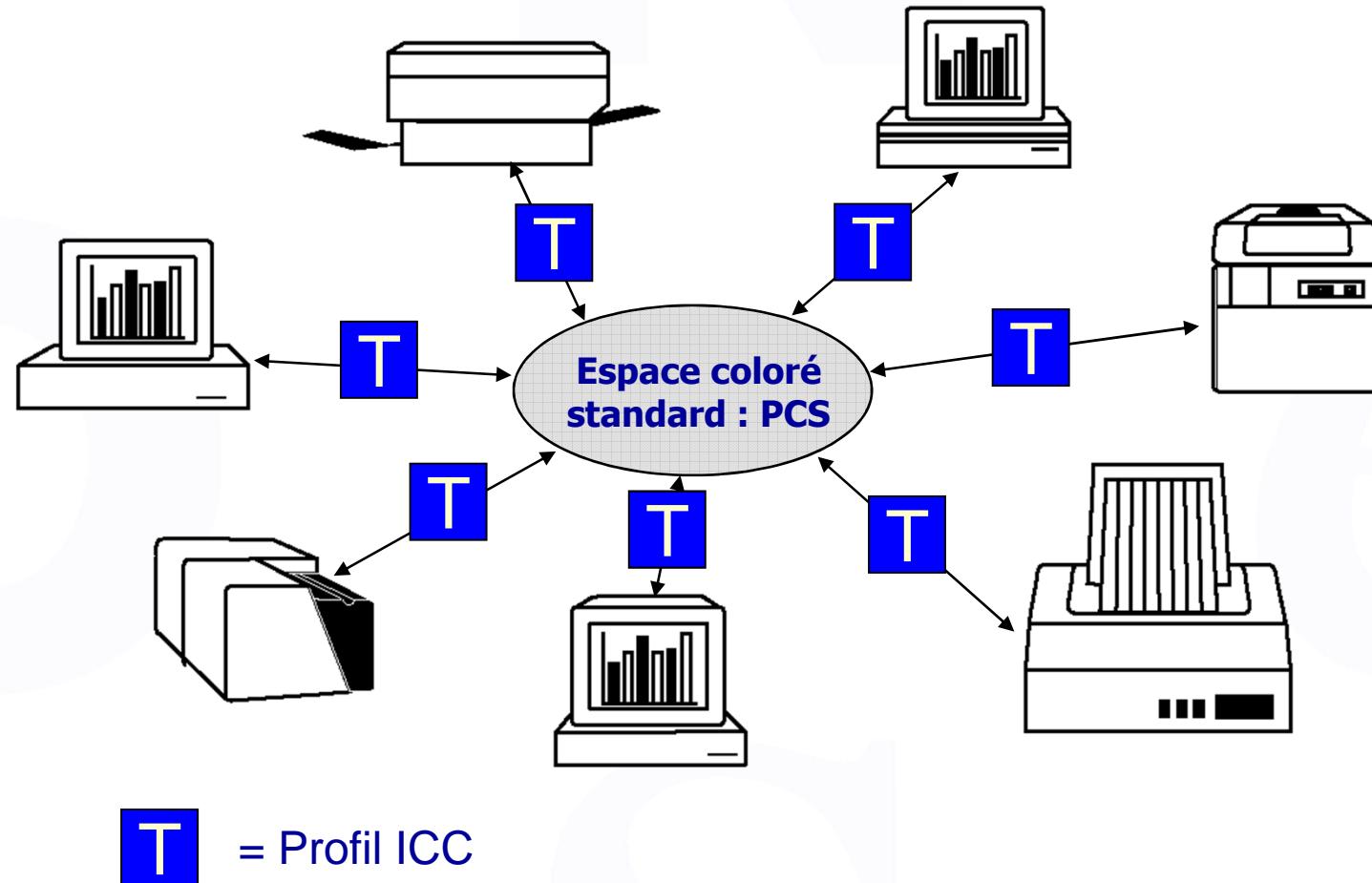


Gestion de la couleur d'une chaîne de traitement d'images

Intérêt de la gestion de la couleur dans une chaîne de traitement d'images

- Objectifs :
 - Caractériser le matériel
 - Travailler indépendamment du matériel
 - Se placer dans un système colorimétrique connu de tous
- Pourquoi est-ce essentiel ?
 - Éviter d'introduire des tendances colorimétriques
 - Communiquer correctement les couleurs

Principe : le PCS (Profile Connecting Space)



Le PCS est soit CIE1931 XYZ, soit Lab, avec le blanc D50 comme illuminant standard

Profil ICC

- Le profil ICC contient les données permettant la transformation depuis le "périphérique" au PCS (ou inversement)
- Plusieurs types de profils:
 - *Périphérique d'entrée* (scanner, caméra, etc.)
 - *Périphérique de sortie* (écrans, imprimantes, flasheurs, etc.)
 - *Device Link* (dédié périphérique à périphérique)
 - *Espace de couleur* (sRGB, CIE XYZ, L*a*b*, etc.) : certaines caméras convertissent directement les images en sRGB
 - ...
- Format binaire taggué
- Peut être intégré à une image (TIF, JPEG, ...)

Appareils de mesure de la couleur

- Égalisation ou comparaison visuelle :
 - Principe : comparer visuellement un échantillon à une collection de carrés de couleurs imprimés sur papier ou affichés à l'écran avec un témoin.
 - Problèmes :
 - Très fortement lié à l'observateur
 - Métamérisme en fonction de la lumière ambiante

Appareils de mesure de la couleur

- **Colorimètres :**

- Appareils destinés à la mesure des composantes trichromatiques ou des coordonnées trichromatiques XYZ d'un stimulus de couleur.
- La sensibilité d'un colorimètre est basée sur celle de l'oeil humain
- Un colorimètre est constitué d'un capteur associé à des filtres dont les propriétés sont proches de celle de l'œil humain et d'un microprocesseur
- Le métamérisme des couleurs ne peut ainsi être mis en évidence du fait que la mesure est effectuée sous un seul illuminant
- Uniquement adapté à l'étalonnage des écrans

Appareils de mesure de la couleur

- Colorimètres à filtres tri-stimuli

- Deux types :

- Les colorimètres avec un récepteur unique devant lequel se situe une roue à trois filtres dont les transmissions spectrales reproduisent les fonctions colorimétriques $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ et $z(\lambda)$. Les trois filtres sont présentés périodiquement devant le photorécepteur du fait de la rotation du support des filtres.
 - Les colorimètres dont le récepteur est constitué de trois cellules photodétecteurs reproduisant les fonctions colorimétriques et fonctionnant simultanément.

Figure 23

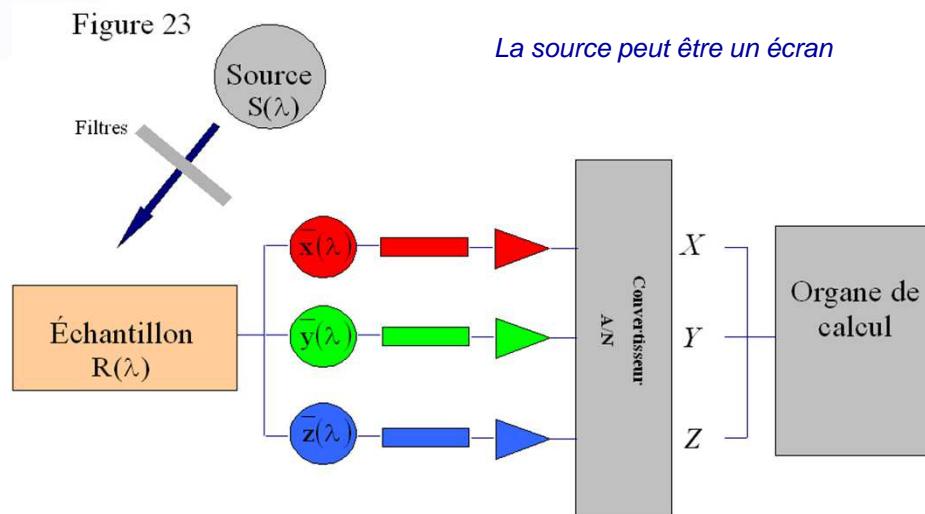
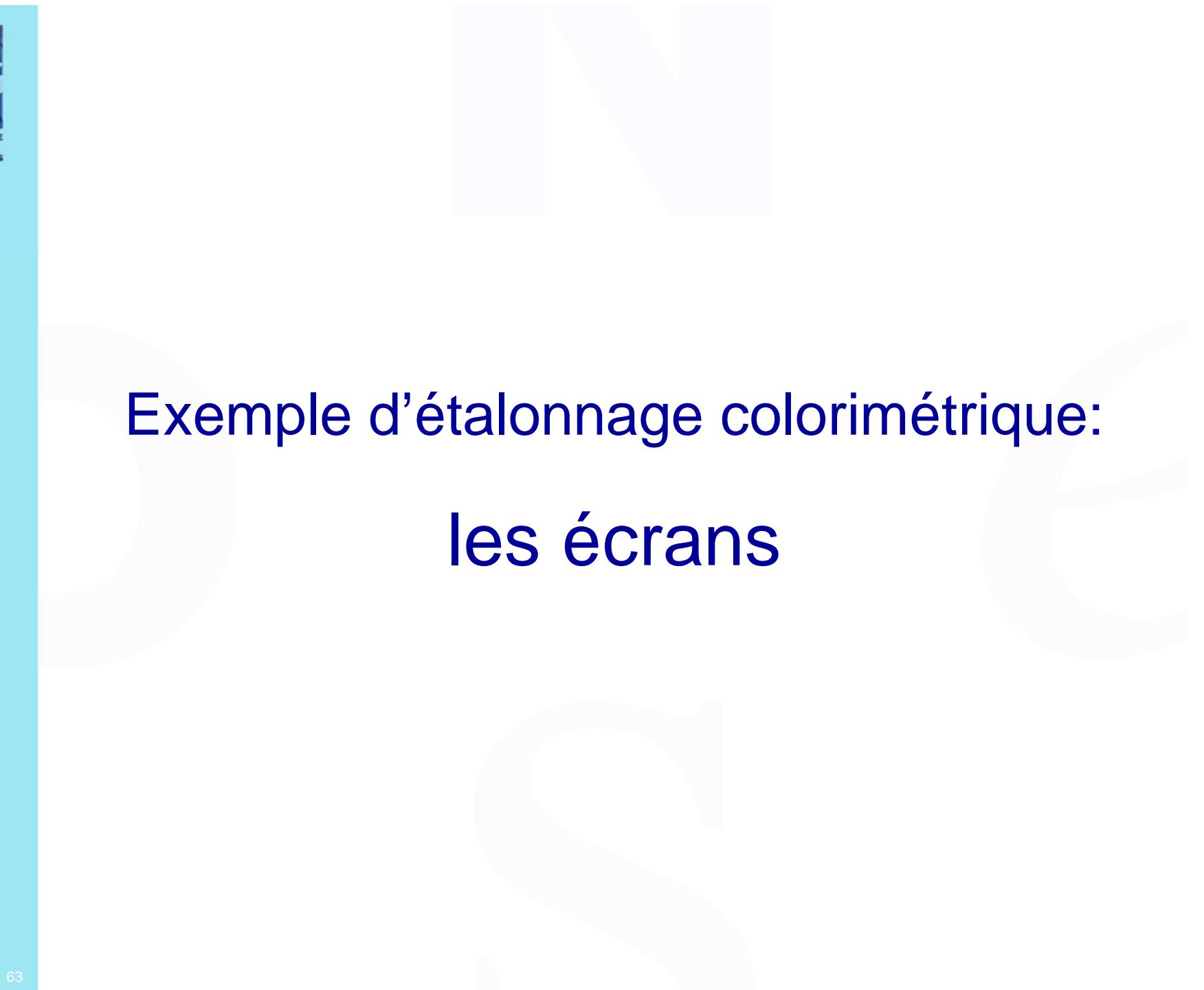


Schéma de principe d'un colorimètre à filtres

- ## Appareils de mesure de la couleur
- **Spectrophotomètre** : mesure de la répartition spectrale d'énergie dans le visible
 - analyse par intervalle de longueur d'onde (de qq nanomètres) l'énergie lumineuse en réflexion ou en transmission d'un objet.
 - obtention d'une courbe spectrale sur un intervalle de longueur d'onde correspondant au spectre visible (380-780 nm).
 - **Spectrocolorimètre** : spectrophotomètre qui calcule les coordonnées trichromatiques XYZ d'un stimulus de couleur
 - **Spectroradiomètre** mesure de la répartition spectrale d'énergie absolue
 - **Thermocolorimètre** : mesure des T° de couleurs
 - Constructeurs : Xrite GretaMacBeth, DataColor, Minolta



Exemple d'étalonnage colorimétrique: les écrans

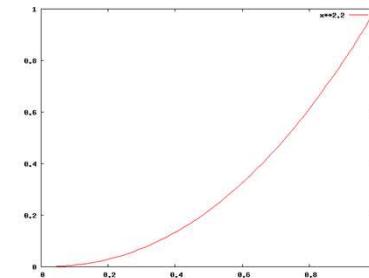
Préalable : notion de gamma d'un écran

- Propriétés des tubes cathodiques :

$$I = A \cdot (k_1 D + k_2)^\gamma \quad \text{avec} \quad \gamma \in [2.2, 2.7]$$

- D , valeur normalisée du pixel, I luminance résultante
- A luminance maximale de l'écran
- k_1 et k_2 : gain et offset de l'écran
- Sous certaines conditions (liées au réglage de l'écran) :

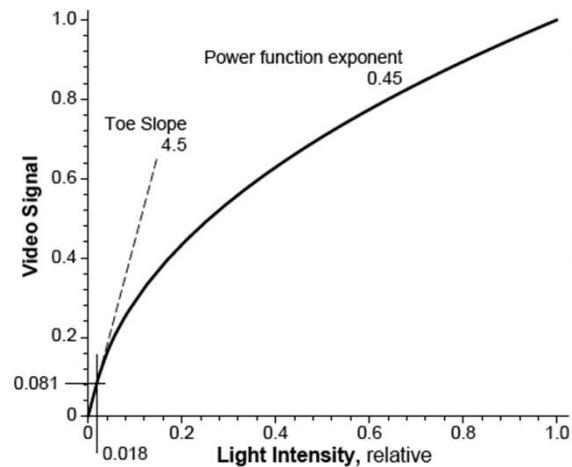
$$I = A \cdot D^\gamma$$



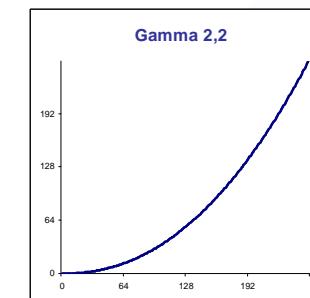
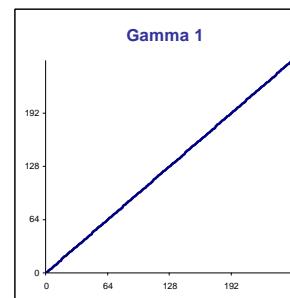
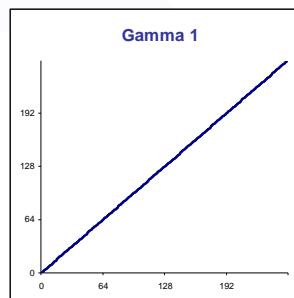
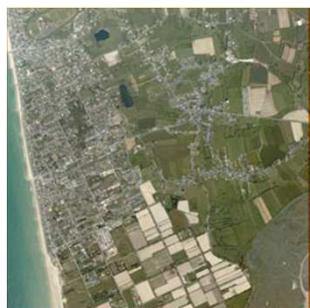
Préalable : notion de gamma d'un écran

- Beaucoup d'espaces de couleur en tiennent compte : sRGB (2,2), NTSC(2,2), etc. (les images dans ces espaces sont modifiées pour tenir compte du phénomène)
- Dans la recommandation 709 :
 - passage XYZ à sRGB:
$$r' = 4,5r \quad \text{pour } R < 0,018$$

$$r' = 1.099 \cdot r^{0,45} - 0.0999 \text{ sinon}$$
- Importance du moment où se fait la correction car certains traitements radiométriques doivent se faire sur des images à réponse linéaire



Préalable : notion de gamma d'un écran



Acquisition

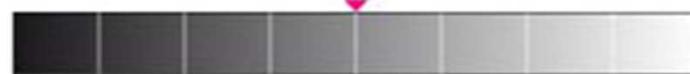


Stockage



Affichage

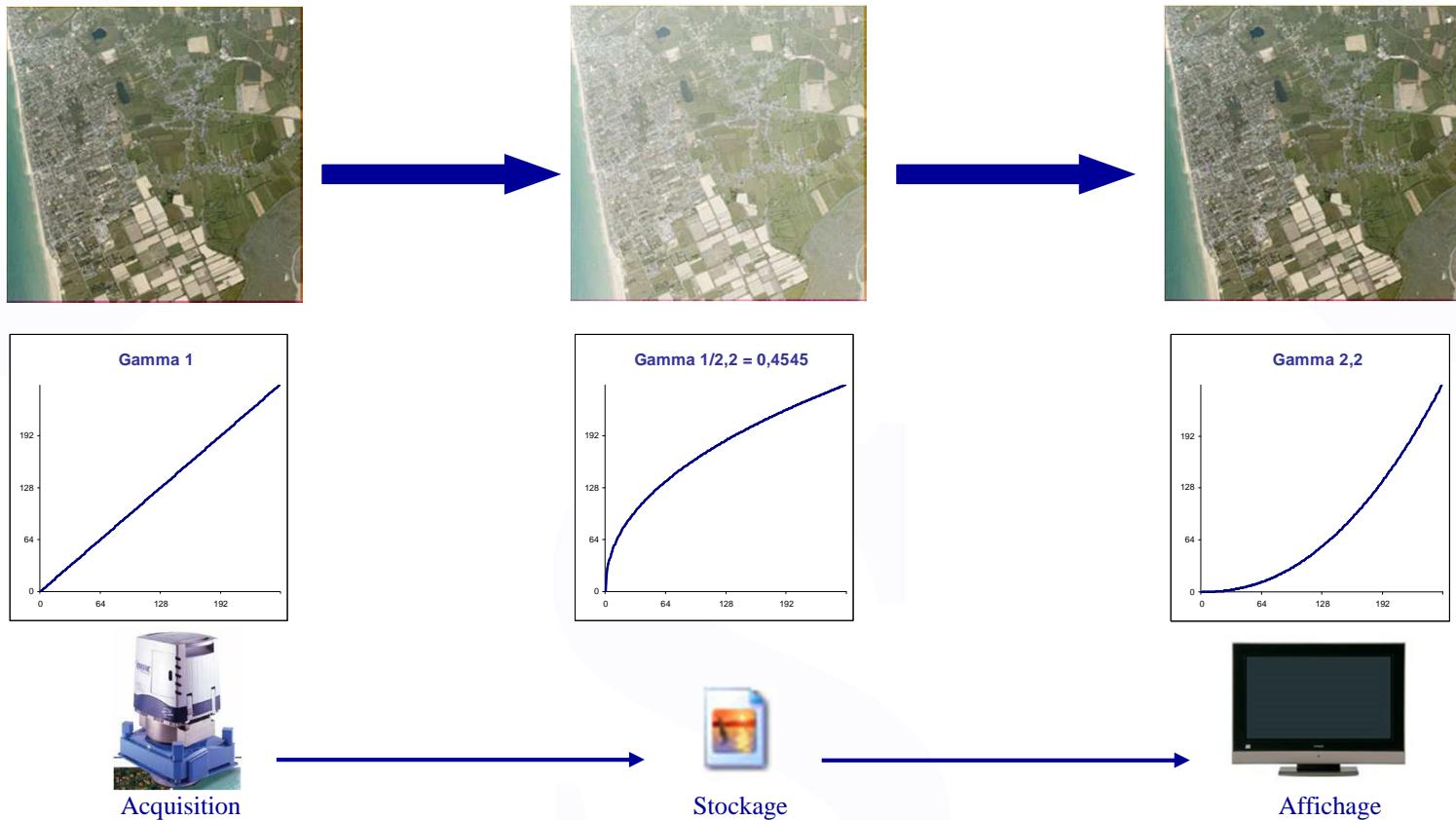
Valeurs numériques



Valeurs de luminance correspondantes

Préalable : notion de gamma d'un écran

- Le gamma total n'est pas forcément 1 (dépend du gamma de l'écran)
- Régler le gamma de l'écran = le fixer à une valeur connue (généralement 2,2)

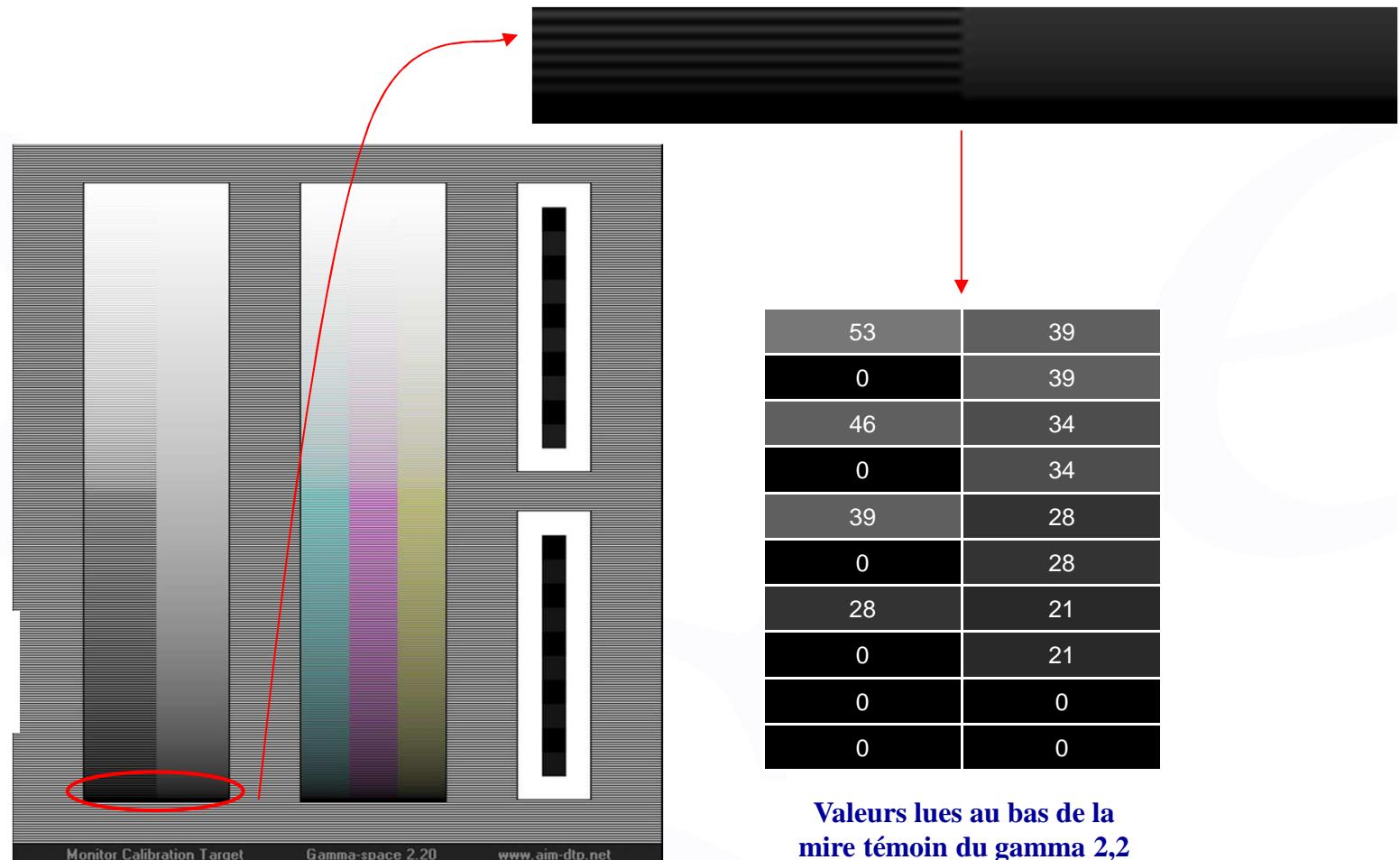


Vérification du gamma d'un écran

- Avec une mire test :

D	I
0	0
21	1
28	2
34	3
39	4
43	5
46	6
50	7
53	8

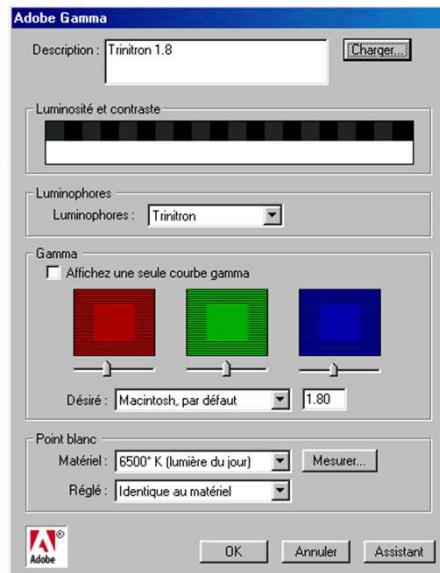
Valeurs de la fonction gamma 2,2 pour certaines valeurs D de radiométrie



Valeurs lues au bas de la mire témoin du gamma 2,2

Comment étalonner un écran ?

- Plusieurs solutions plus ou moins rigoureuses :
 - Profil constructeur : moyenne des caractéristiques des écrans en sortie d'usine
 - Avec un logiciel d'égalisation : Adobe Gamma, QuickGamma, Wizifyg, ...



— Avec une sonde
(colorimètre, spectrophotomètre)



Comment étalonner un écran ?

- Préalable : contrôle de l'environnement, stabilité du matériel
- Deux étapes :
 - **Calibrage** : on se place dans les conditions optimales d'utilisation
 - La luminosité maxi - point blanc - de l'écran
 - Le contraste
 - Le gamma
 - La température de couleur - en Kelvins
 - Et éventuellement la luminosité mini - le point noir
 - **Caractérisation** : on mesure comment l'ordinateur reproduit les couleurs → création du profil

Comment étalonner un écran ?

- Gestion par la carte graphique





Exemples d'étalonnage colorimétrique: les caméras

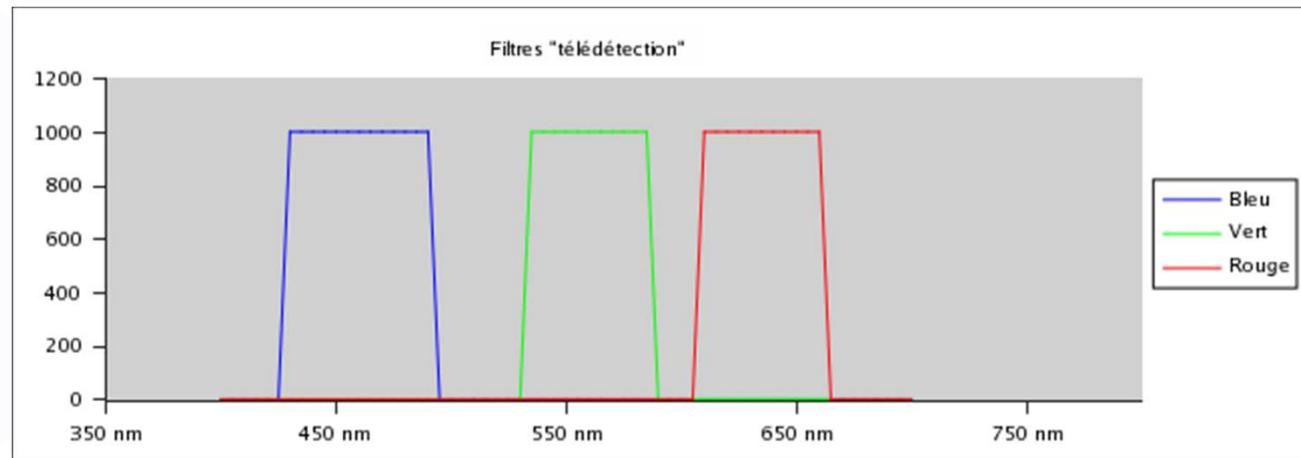


Principe

- Trouver la matrice 3x3 qui fait passer de l'espace RGB de la caméra à l'espace de connexion CIE XYZ
- Pas de solution unique, sauf si les filtres sont équivalents à ceux de la CIE
- Plusieurs méthodes possibles
 - Par moindres carrés avec des échantillons réels (mire colorée). PB : taille de la mire
 - Par moindres carrés avec des échantillons virtuels : distributions spectrales simulées et calcul avec les réponses théoriques des filtres
- La solution dépend du choix d'échantillons

Filtre des caméras numériques

- Caméra ADS 40 (Leica) : filtre de type « télédétection » ⇒ mauvaise colorimétrie



Réponse du filtre

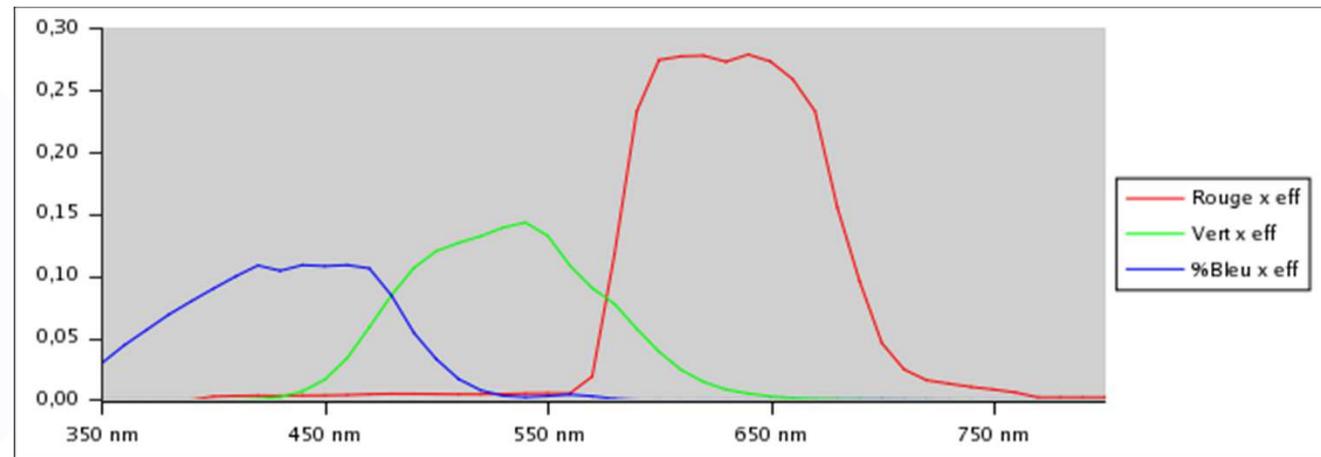


Réponse de l'oeil



Filtre des caméras numériques

- Caméra IGN V1 : filtres plus proches de la vision humaine



Réponse du filtre



Réponse de l'oeil



Exemple d'étalonnage d'une caméra avec capteur bayer

- Définition d'une matrice de passage M
 - $[X \ Y \ Z] = [R \ V \ B]^* M$
 - 2 méthodes de détermination de M :
 - étude des courbes spectrales de la caméra
 - utilisation d'une mire

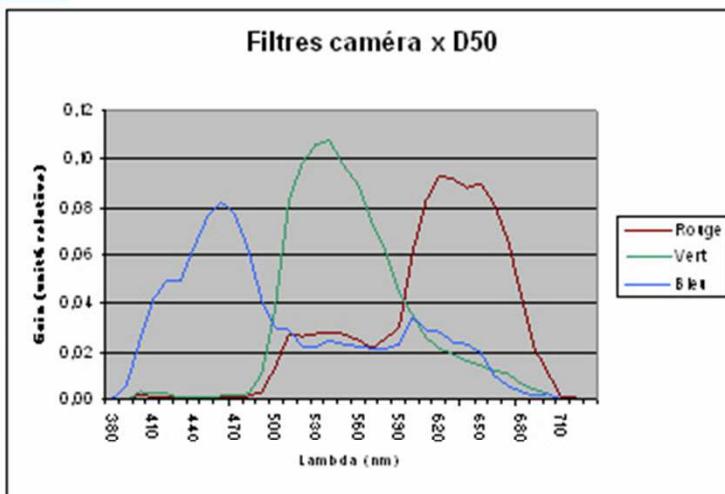


Image bayer
sans correction colorimétrique

Stage d'Ivan Marchand effectué au laboratoire
MATIS, encadré par Gilles Martinoty

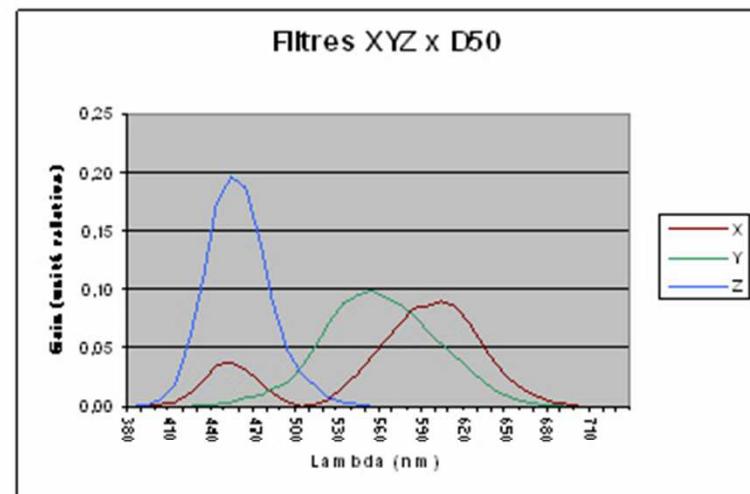
Exemple d'étalonnage d'une caméra avec capteur bayer

- Étude des courbes de réponses de la caméra Bayer



Courbes de réponses des filtres de la caméra Bayer

$\times M =$



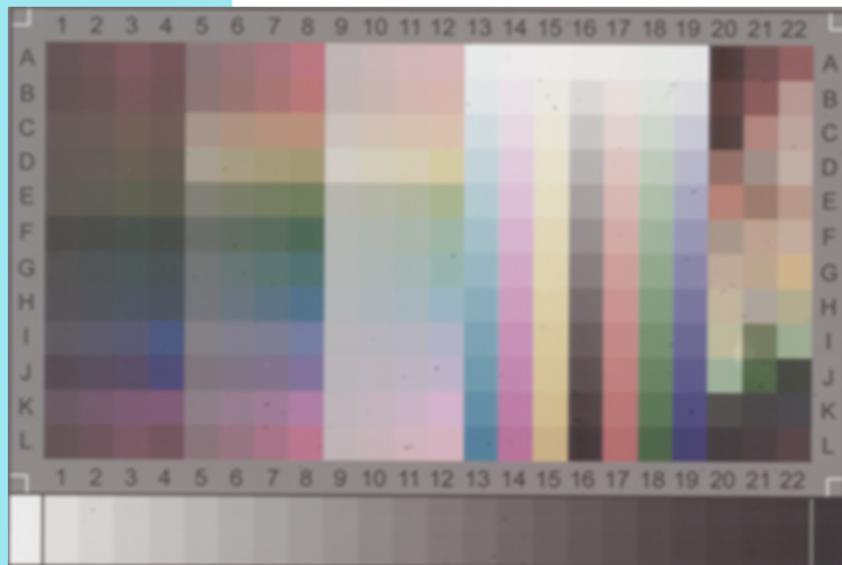
Courbes de réponses des filtres de l'œil humain

Résolution par
moindres carrés

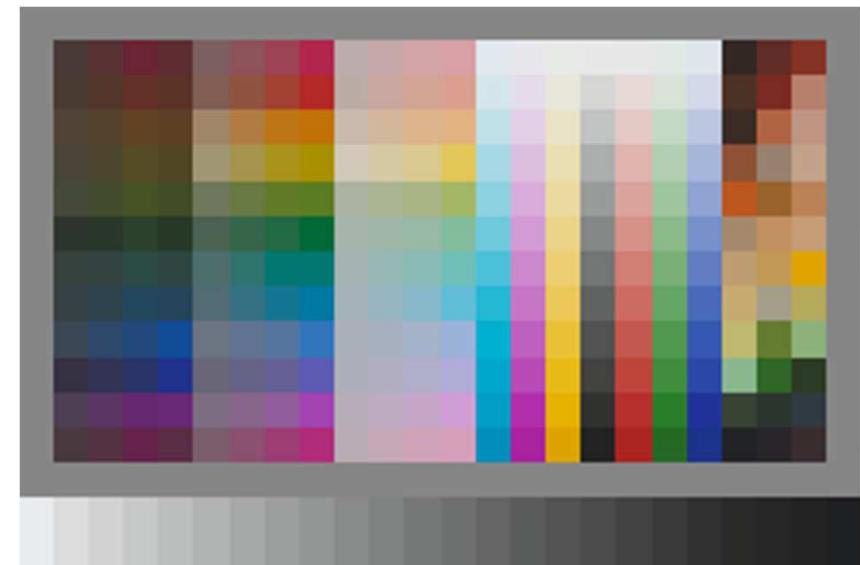
M

Exemple d'étalonnage d'une caméra avec capteur bayer

- Utilisation d'une mire colorimétrique



Mire prise par caméra Bayer



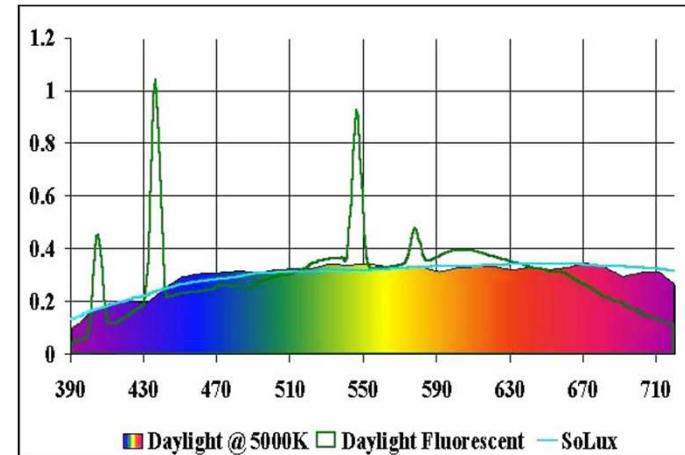
Mire témoin

Résolution par
moindres carrés

M

Exemple d'étalonnage d'une caméra avec capteur bayer

- Utilisation d'une mire colorimétrique
 - Nécessité de fixer l'illuminant lors de l'étalonnage dans les mêmes conditions que la prise de vue. Ex : lampe Solux

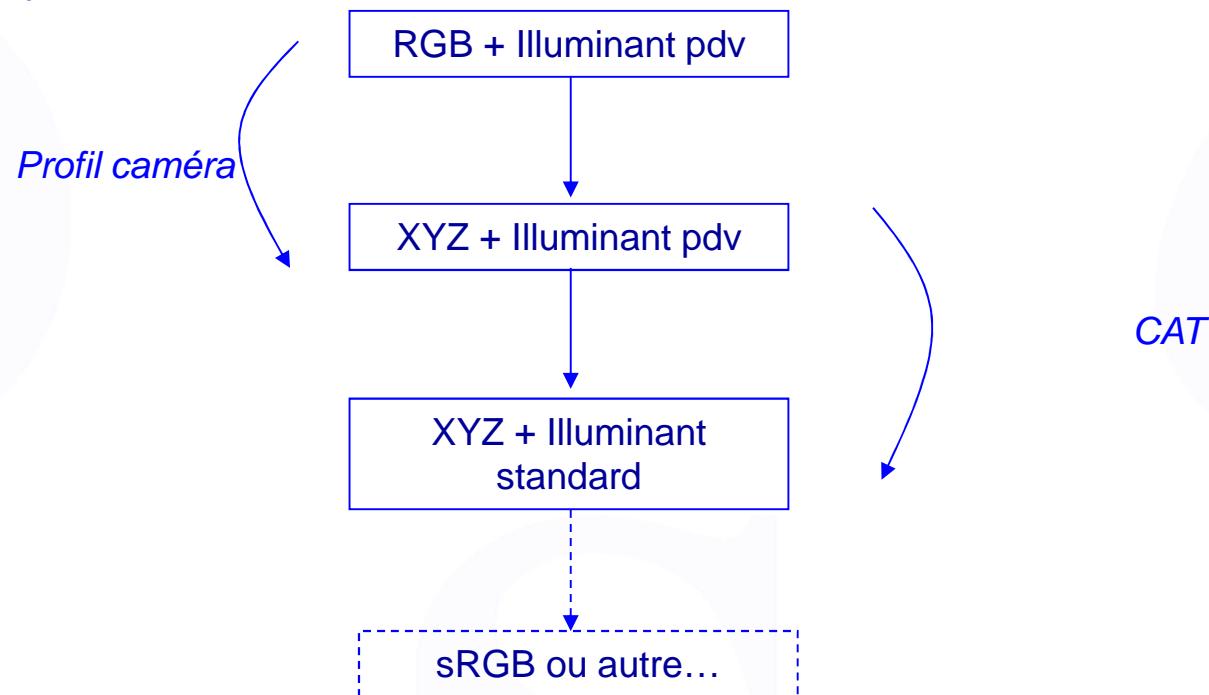


ou

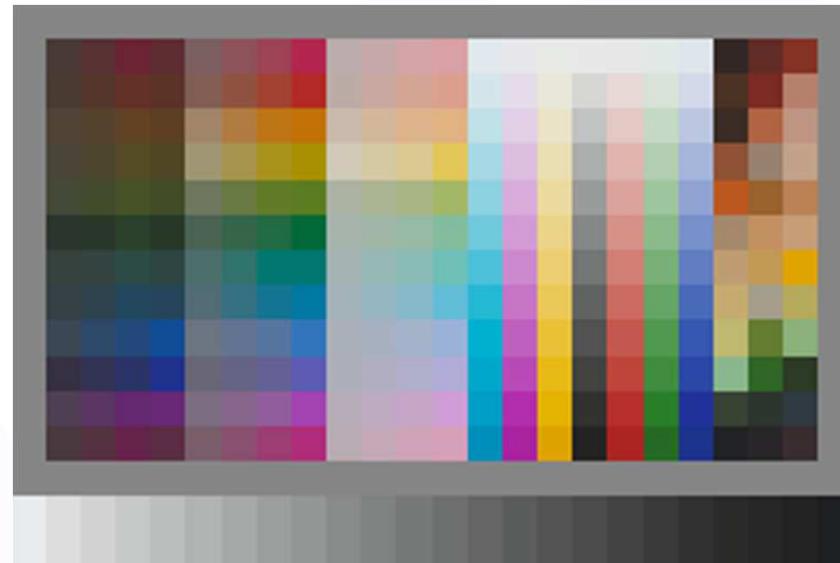
- Mesurer l'illuminant avec un colorimètre ou un spectrophotomètre et tenir compte de ces caractéristiques

Exemple d'étalonnage d'une caméra avec capteur bayer

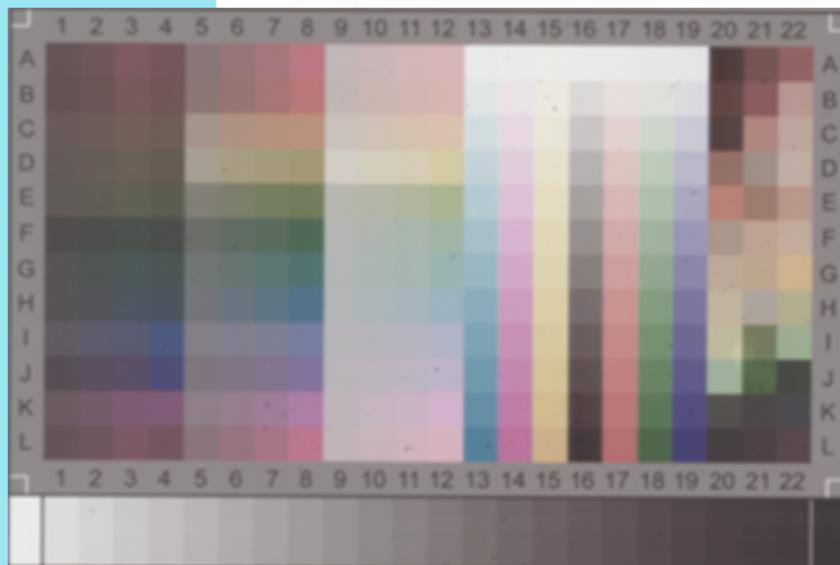
- Nécessité d'effectuer des conversions pour passer d'un illuminant à un autre : « chromatic adaptation » (CAT)



Résultat



Mire témoin

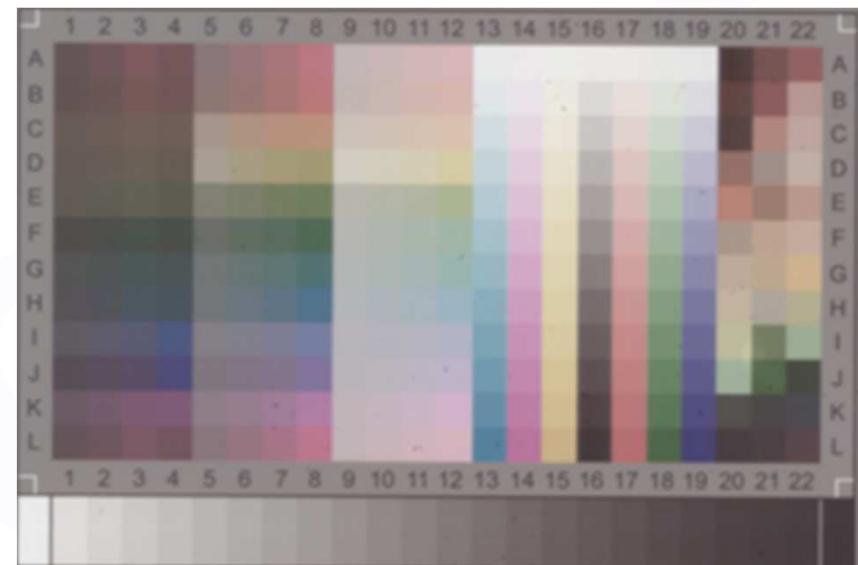


DIAS

L.Chandelier

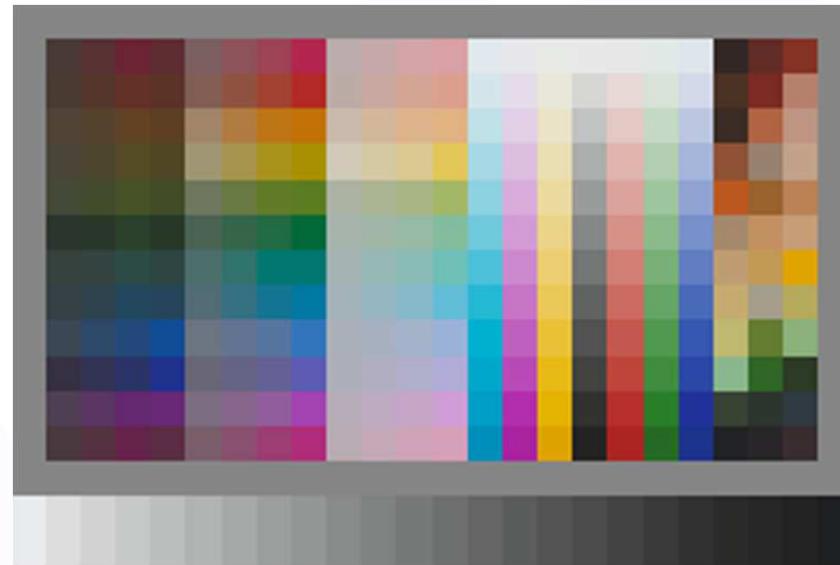
81

Mire non corrigée

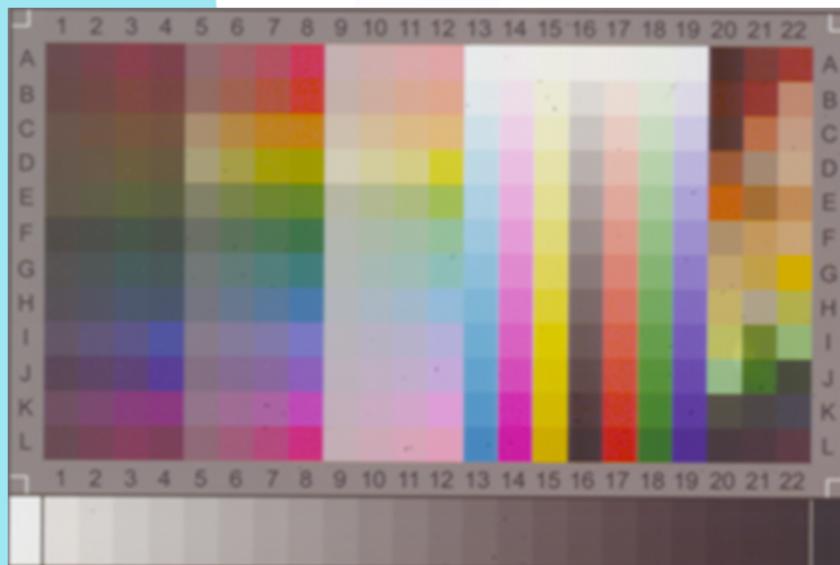


Mire non corrigée

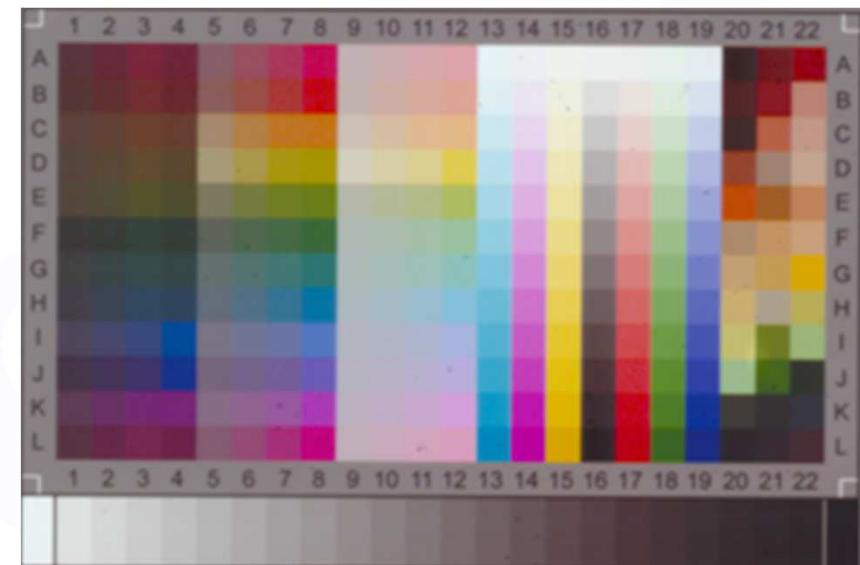
Résultat



Mire témoin



DIAS Mire corrigée avec les courbes de réponses



Mire corrigée avec les images

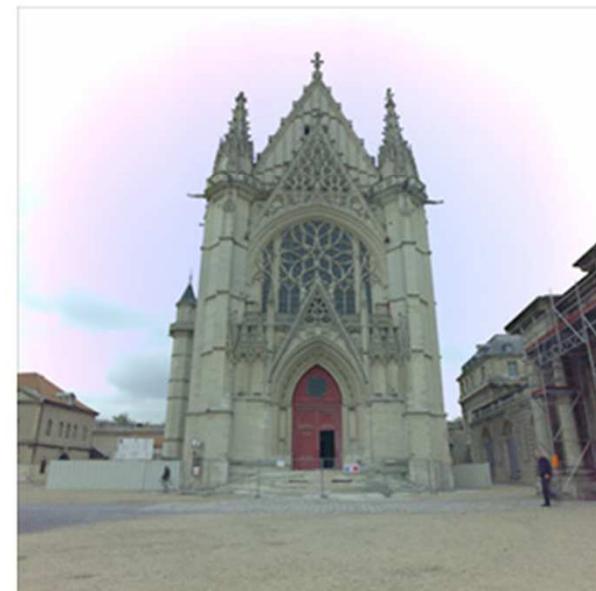
Résultat



Avant correction



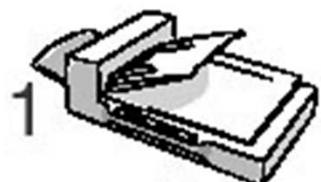
Après correction



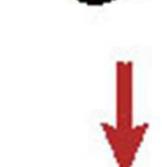
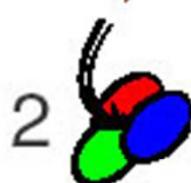
Rapport de stage d'Ivan Marchand – MATIS – 2005 – encadré par Gilles Martinoty

Bilan : la gestion de la couleur

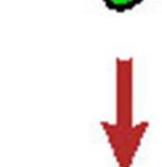
Gestion colorimétrique de la chaîne de traitement d'image



1 L'image est numérisée ou obtenue d'une caméra numérique, le fichier est brut, sans profil.



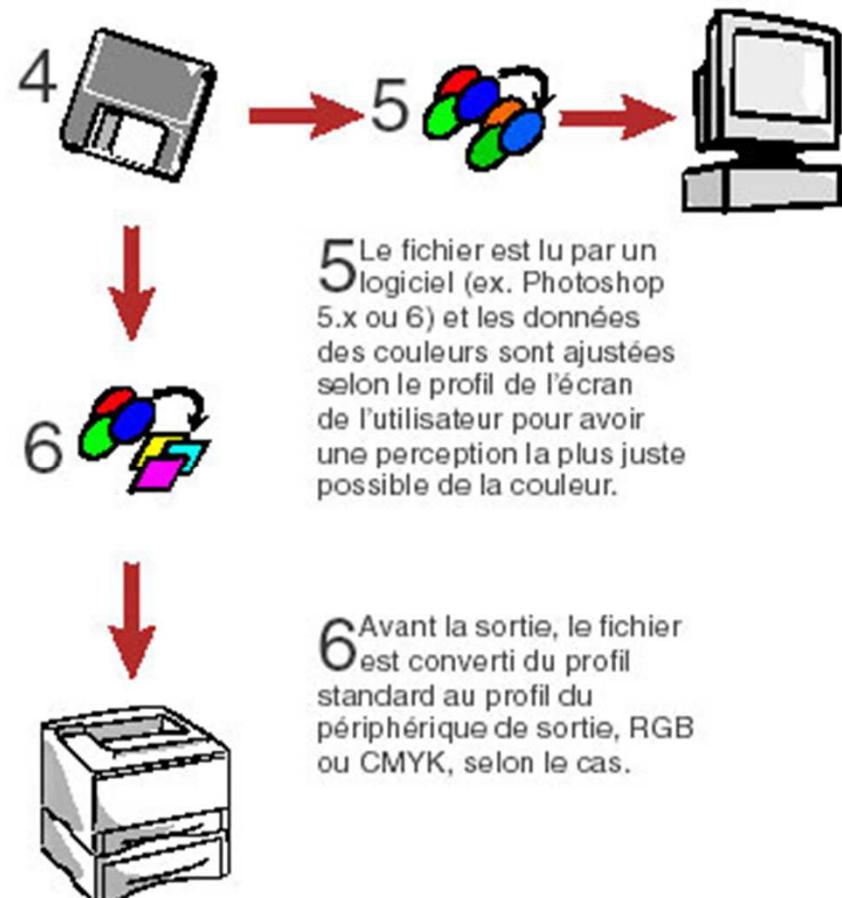
2 Le profil couleur de la source est assigné au document. Aucune donnée n'est altérée, il s'agit de changer la définition des données du fichier.



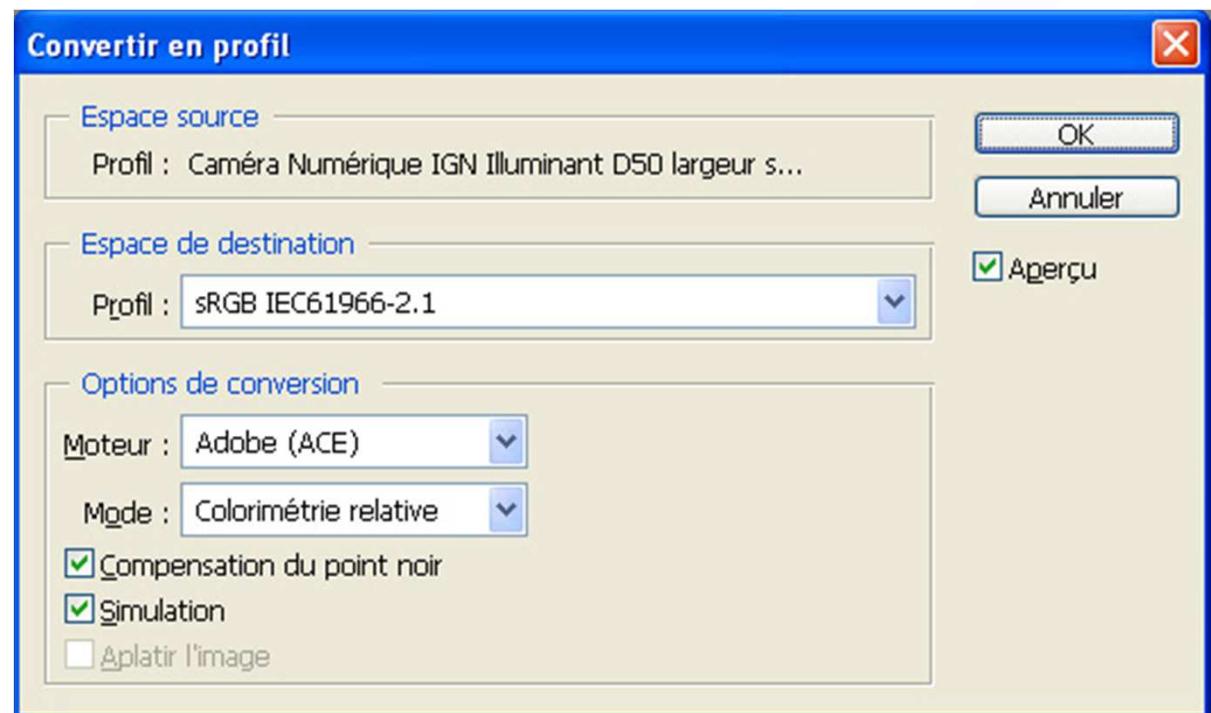
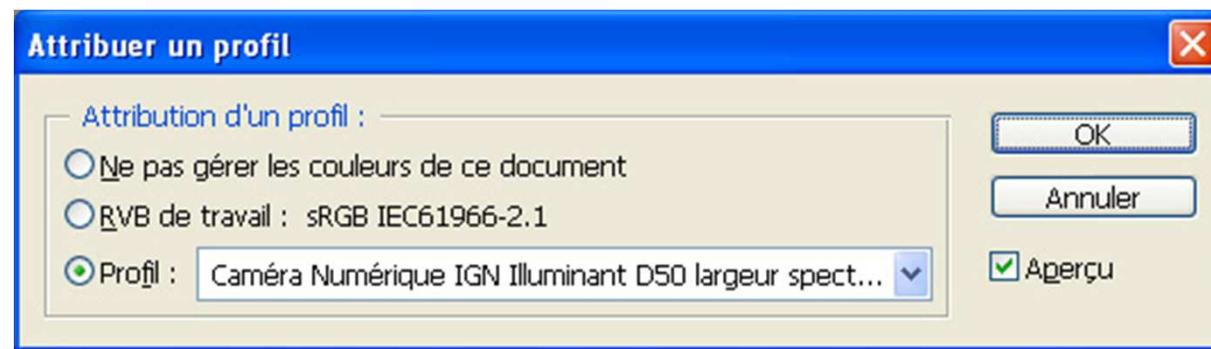
3 Le document est converti du profil de l'appareil à un profil connu et standard. Les données du fichier sont altérées pour correspondre au nouveau profil, qui sera assigné au fichier.

4 Le fichier est stocké avec le profil standard.

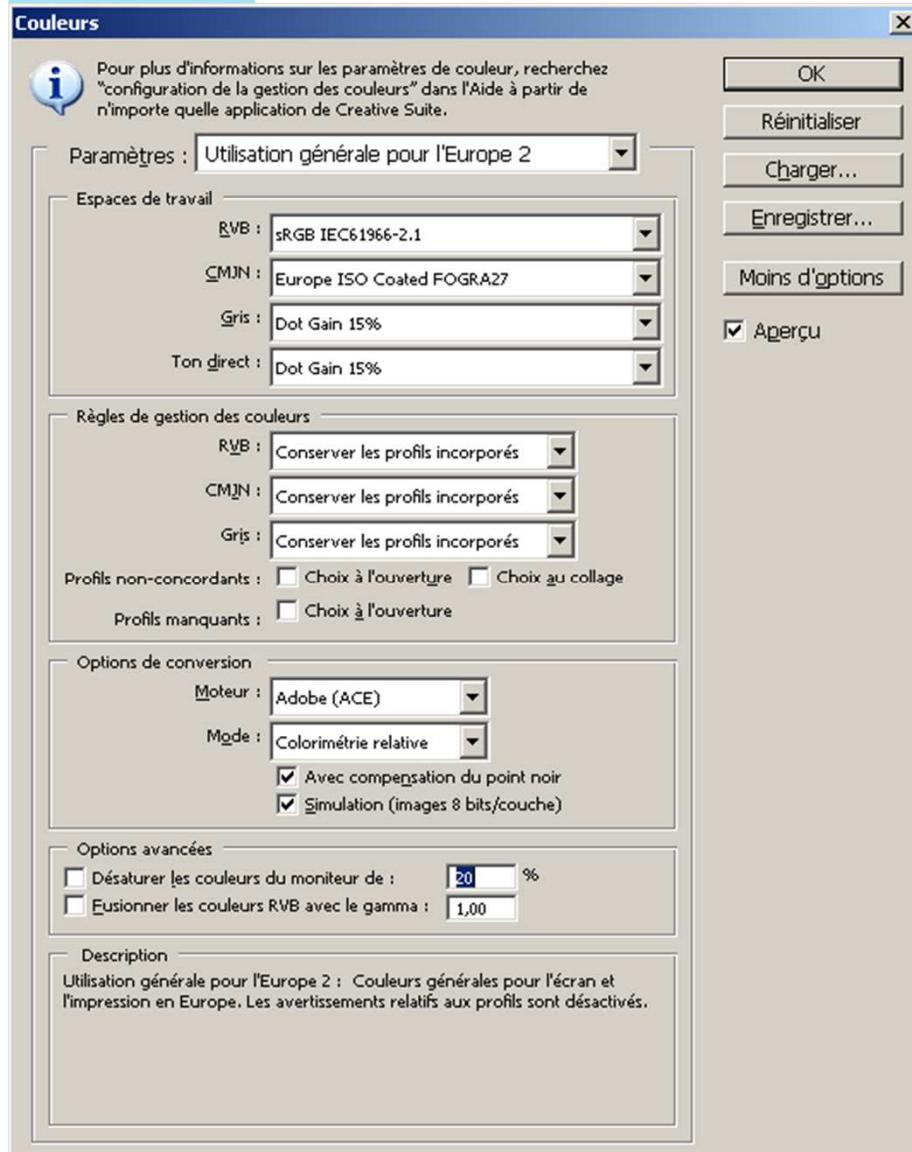
DIAS



Gestion colorimétrique de la chaîne de traitement d'image : exemple Photoshop



Gestion colorimétrique de la chaîne de traitement d'image : exemple Photoshop



Notion **d'espace de travail** =
espace colorimétrique dans lequel
travaille le logiciel de traitement
d'images.

Différentes méthodes de conversion
entre espaces

Références

- ◆ Cours de multimédia de Pierre Courtellemont :
http://perso.univ-lr.fr/pcourtel/espodon/site_web/index.htm
- ◆ Cours de traitement d'images de Jérôme Vincente :
<http://iusti.polytech.univ-mrs.fr/~vicente/enseignement.html>
- ◆ Notions de base sur la couleur, C.Fernandez-Maloigne :
http://www710.univ-lyon1.fr/~fdenis/club_EEA/cours/sommaire_image.html
- ◆ Calibrage et gestion de la couleur - Thierry Goulet :
http://webperso.mediom.qc.ca/~hleclerc/blog/documents/gestion_clr.pdf
- ◆ Stage d'Ivan Marchand effectué au MATIS – été 2005