

LA COULEUR

1 - Introduction

la couleur est un phénomène à la fois **psychophysique** et **psychophysique** qui dépend :

- de la physique de la lumière
- de l'interprétation de la lumière par le système oeil-cerveau

1.1 - La physique de la lumière

la lumière est un mélange d'ondes électromagnétiques se propageant avec la même vitesse $c = 3.10^8$ m/s.

➤ chaque composante du mélange d'ondes, appelée **monochromatique**, a une période T , une fréquence f et une longueur d'onde λ telles que : $\lambda = c.T$ $T = 1/f$

➤ **photon** = corpuscule associé à l'onde électromagnétique. Le photon a une énergie $\epsilon = h.f$ ($h = 6.62 \cdot 10^{-34}$)

➤ une source lumineuse est définie par une **distribution spectrale d'énergie** $E(\lambda)$. En fait, $E(\lambda) d\lambda$ est le nombre de photons correspondant aux longueurs d'onde comprises entre λ et $\lambda + d\lambda$:

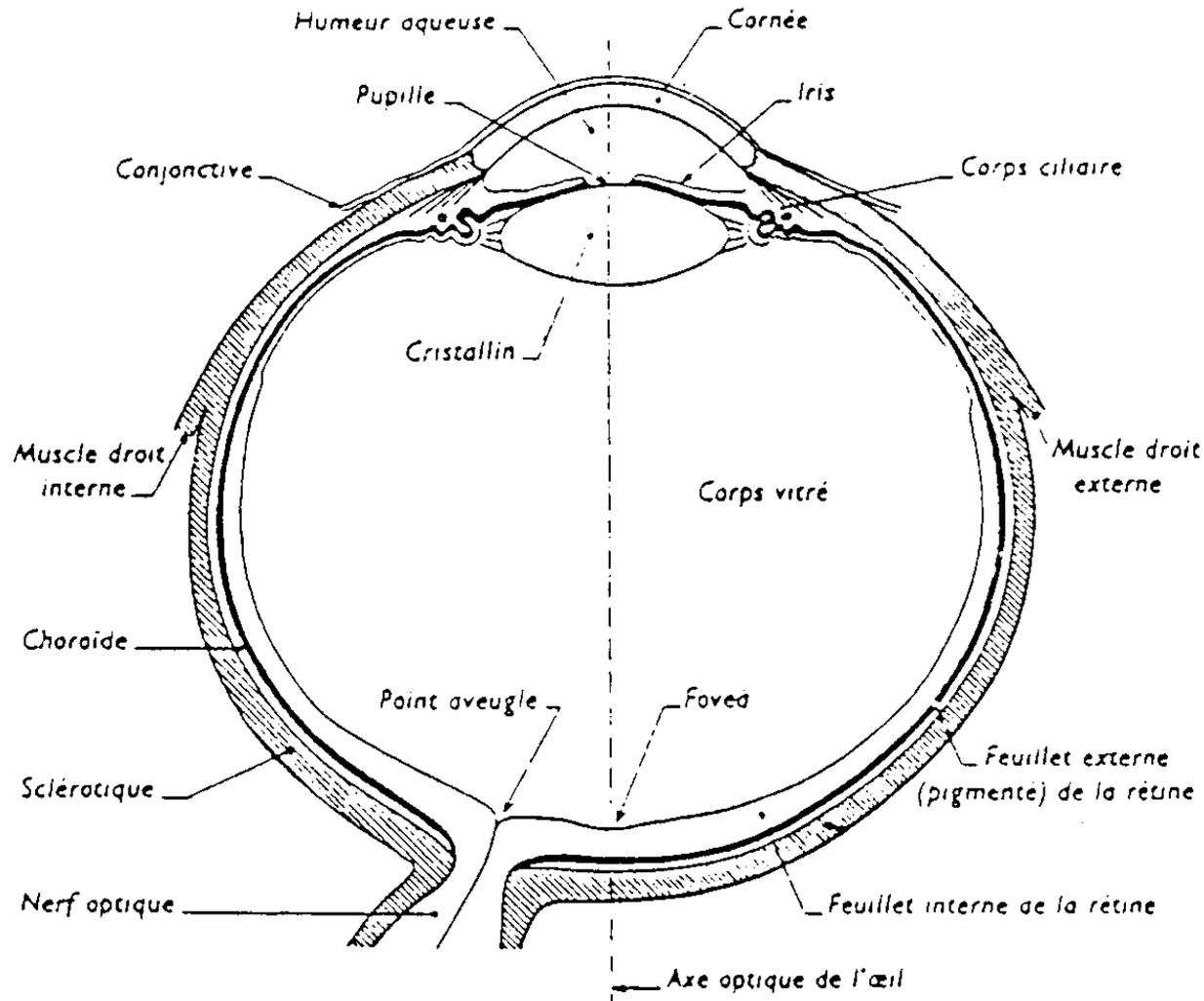
$$E(\lambda) = h.c / \lambda$$

➤ le système visuel humain interprète l'énergie électromagnétique comme de la lumière visible entre 380 et 780 nm.

MAIS l'énergie électromagnétique n'a pas de couleur.

1.2 - Le système visuel humain

1.2.1 - L'oeil



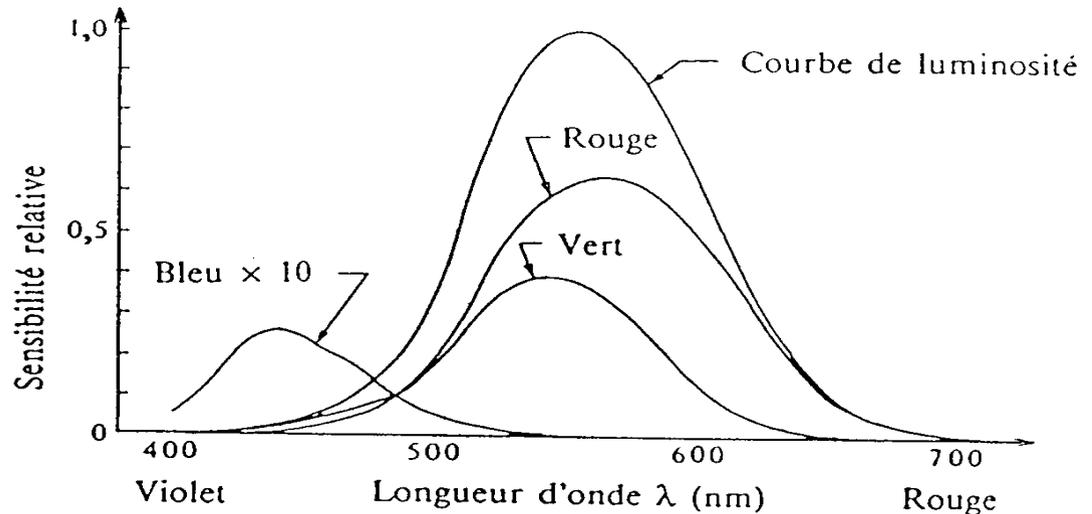
iris => diaphragme

muscles ciliaires => forme de la pupille(lentille) => focalisation sur la rétine

sur la rétine, il existe 2 types de cellules photo-réceptrices :

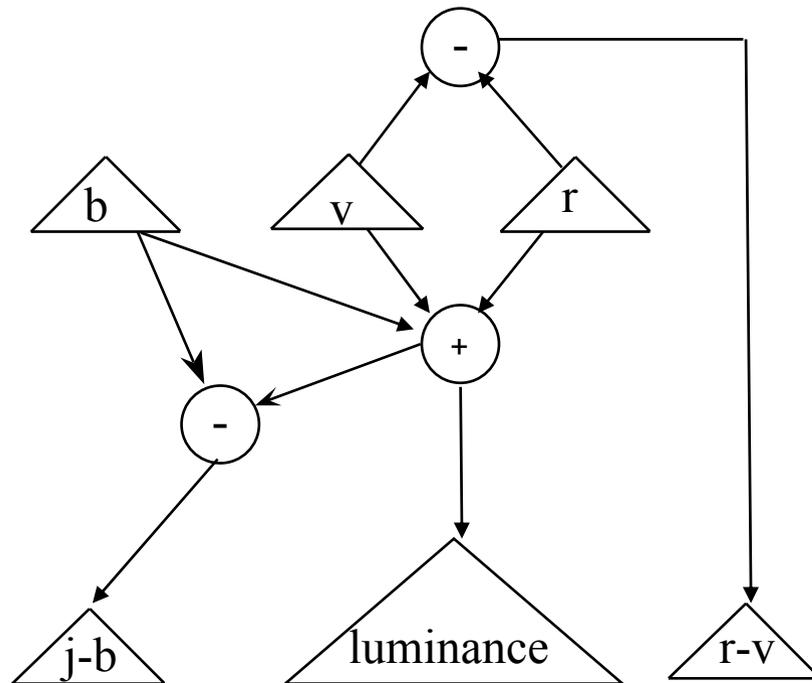
- les **bâtonnets**, plus sensibles à la lumière que les cônes
- les **cônes**, permettant la vision des couleurs

les pigments des cônes sont de trois types, caractérisés chacun par leur sensibilité spectrale :



1.2.2 - Le mécanisme visuel

- stimulus externe => activation d'un bâtonnet ou d'un cône => transition photochimique => influx nerveux
- en fait, mécanismes pas bien connus => plusieurs hypothèses



1.3 - Attributs psychophysiolgistes

la sensation de couleur est définie par

luminance (pour source) ou clarté (pour objet)

=> correspond à l'énergie rayonnant jusqu'à l'œil ;

teinte : composante de base de la couleur

=> correspond à la longueur d'onde dominante ;

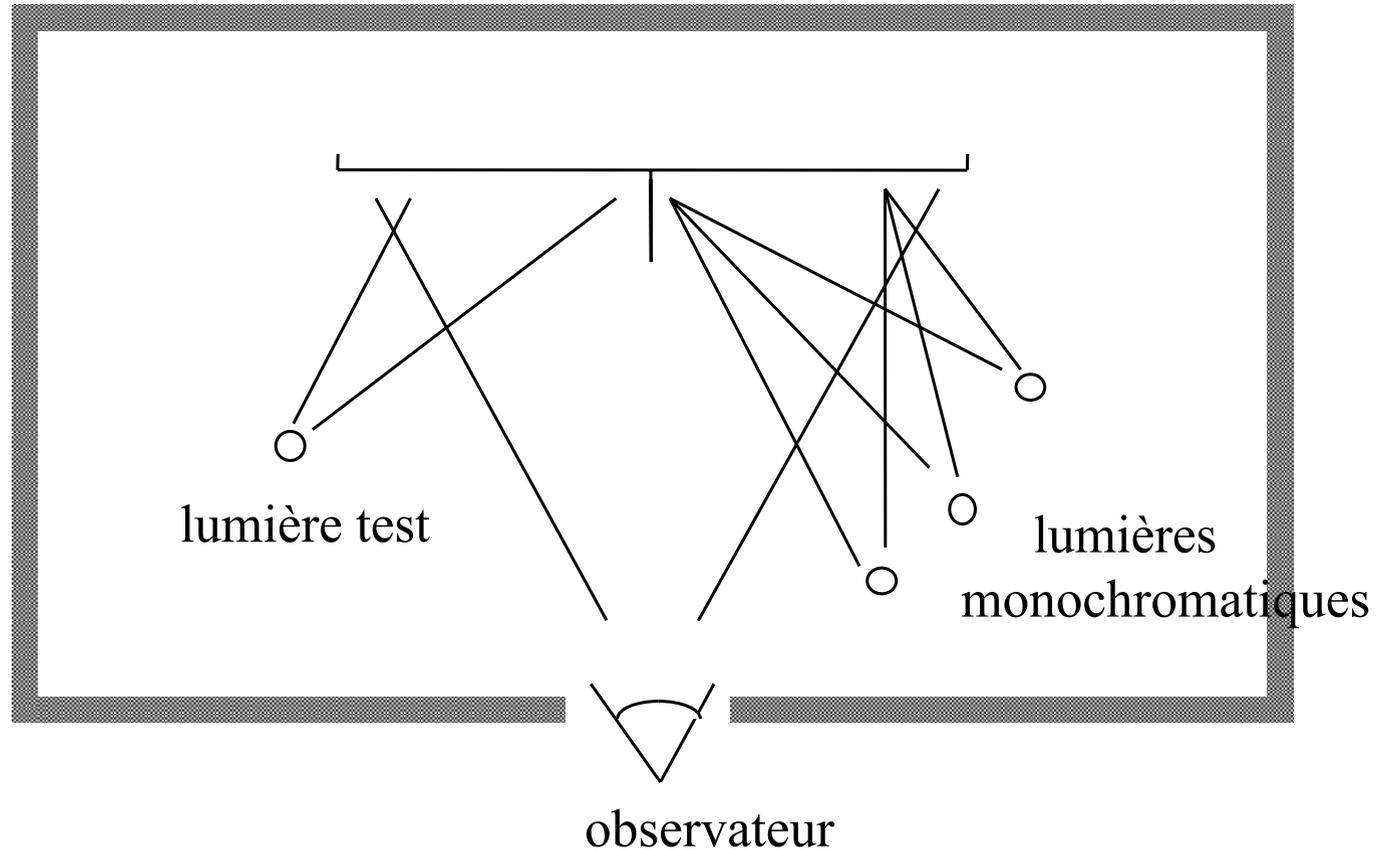
saturation (couleur saturée = couleur proche de la couleur monochromatique de même teinte) => correspond à la largeur du spectre.

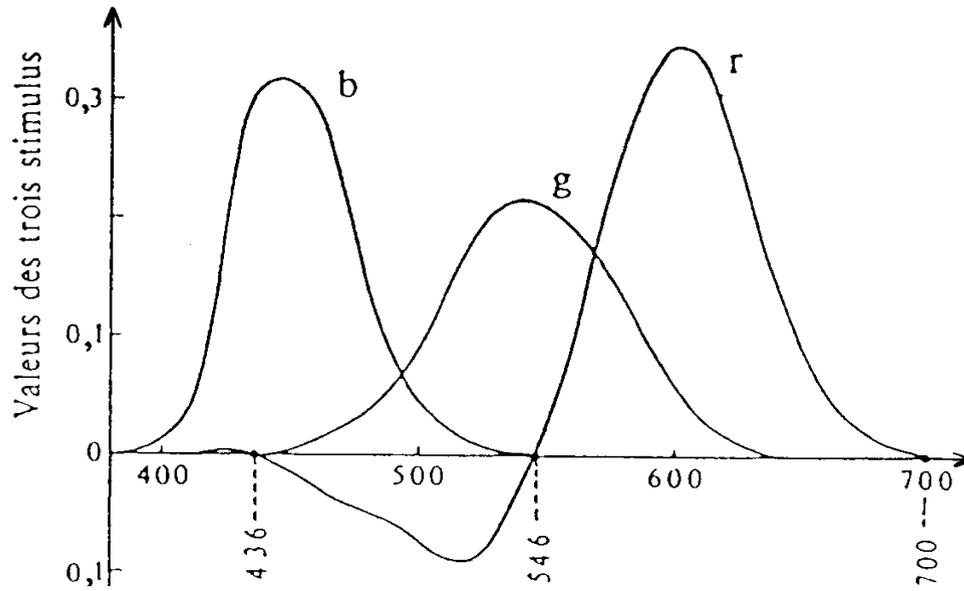
la luminance est achromatique

la teinte, la saturation sont chromatiques

2 - la perception des couleurs

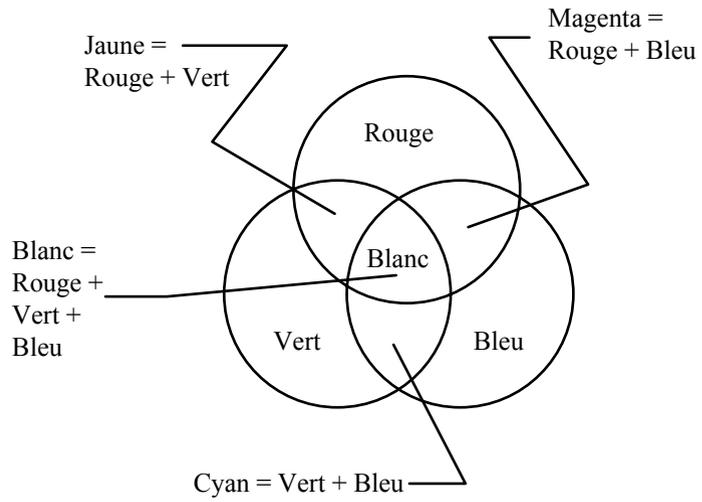
2.1 - Rendu additif





=> Lois de Grassmann :

- 1. Toute couleur peut être rendue au moyen d'au plus trois primaires
- 2. Le système visuel humain ne sait pas identifier les primaires lors du rendu
- 3. Quatre couleurs sont toujours reliées linéairement
- 4. Loi d'addition :
$$M = N \text{ et } P = Q \Rightarrow M+P = N+Q$$
- 5. $M = N \text{ et } N = P \Rightarrow M = P$
- 6. L'espace des couleurs en 3 dimensions est continu



le système visuel peut distinguer environ 350 000 couleurs

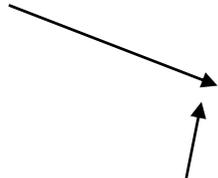
il peut distinguer entre elles des couleurs d'ondes distantes d'environ 1 nm dans la partie bleue-jaune du spectre et 10 nm aux extrémités du spectre

il peut distinguer environ 128 niveaux de luminance

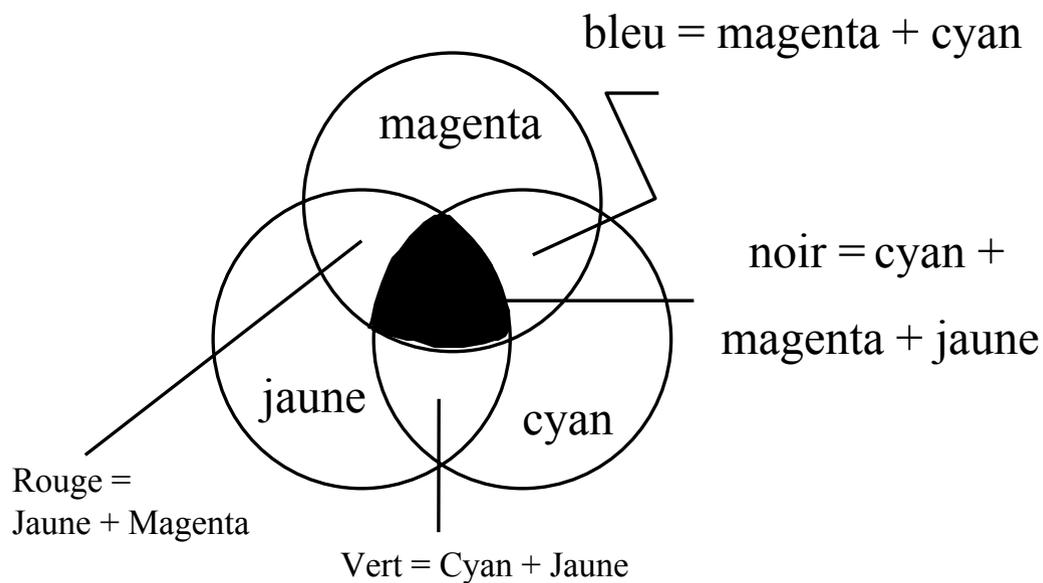
16 saturations de jaune

23 saturations de rouge-violet

sont distinguables



2.2 - Rendu soustractif



3. Colorimétrie

3.1- Système de primaires monochromatiques CIE

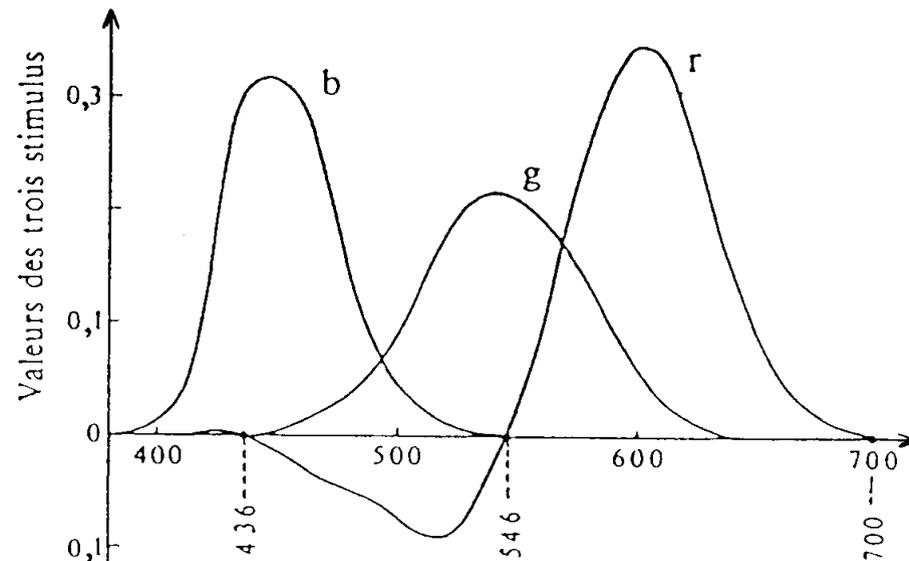
système standard développé en 1931 en utilisant les primaires monochromatiques

700 nm (dans le rouge)

546,1 nm (dans le vert)

435,8 nm (dans le bleu)

expériences \Rightarrow courbes



si une source de lumière a un spectre $S(\lambda)$

$$X = \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

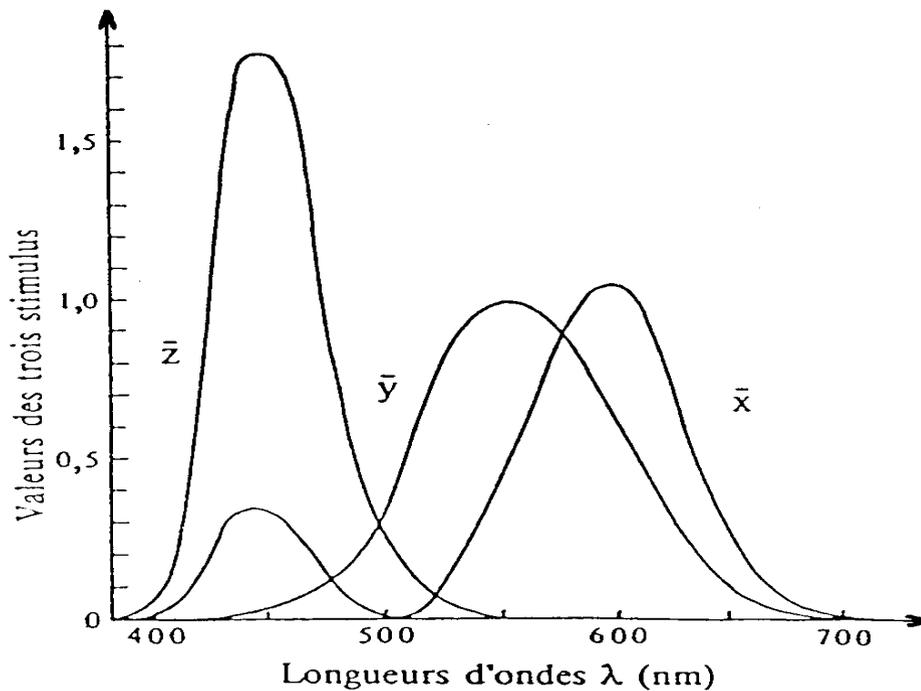
$$Z = \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

3.2 - Système XYZ CIE

Système de primaires purement artificielles déduit linéairement du précédent, dont les axes sont en dehors du cône vectoriel des couleurs

Spécifications :

1. Une des fonctions d'appariement est la courbe de sensibilité de l'oeil
 2. Elimination des valeurs négatives
 3. Aires définies par les courbes d'appariement sont égales
- => 3 couleurs primaires théoriques appelées X, Y et Z et trois courbes d'appariement :

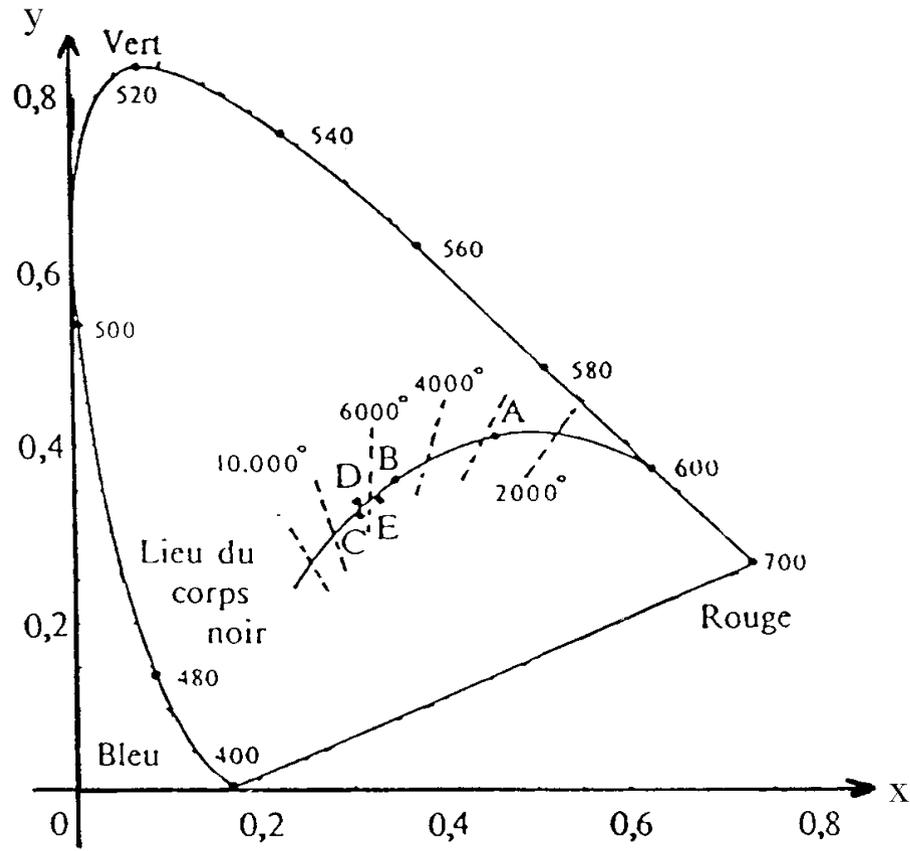


valeurs de chromaticité : $x = \frac{X}{X+Y+Z}$ $y = \frac{Y}{X+Y+Z}$ $z = \frac{Z}{X+Y+Z}$

la projection sur le plan $X+Y+Z = 1 \Rightarrow$ **coordonnées de chromaticité** x et y

x et y n'indiquent pas la luminance ; celle-ci est incorporée à Y

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



contour => lieu du spectre visible
 couleurs pures sur contour spectre

ligne droite => droite du pourpre

lieu du corps noir => couleur corps noir théorique

E = pt blanc d'égal énergie

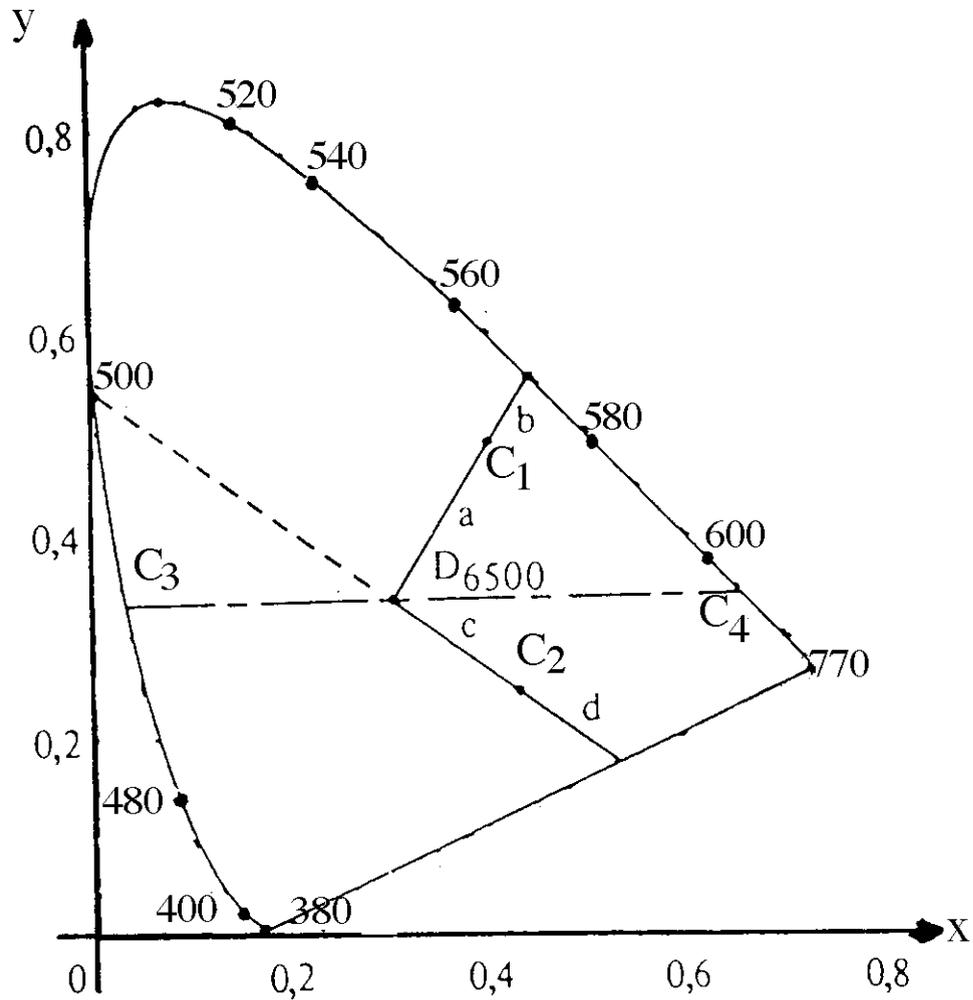
A = couleur à 2850°K d'une ampoule à
filament de tungstène

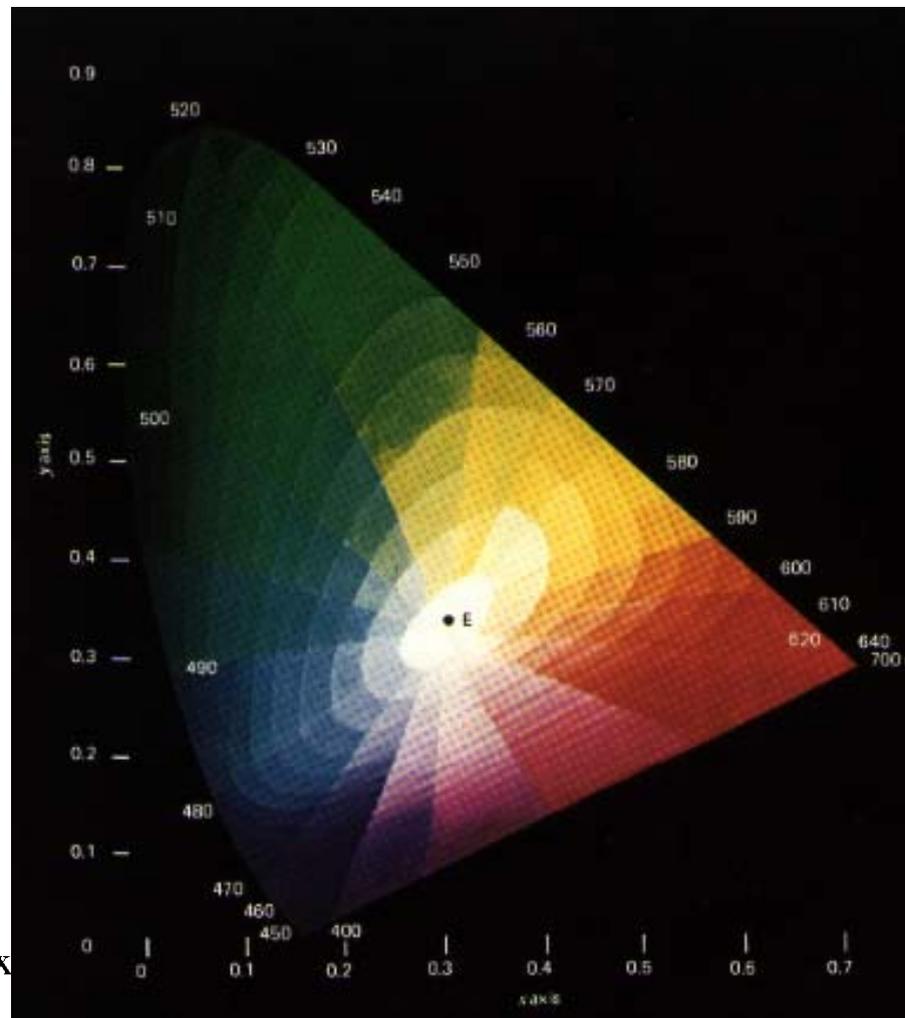
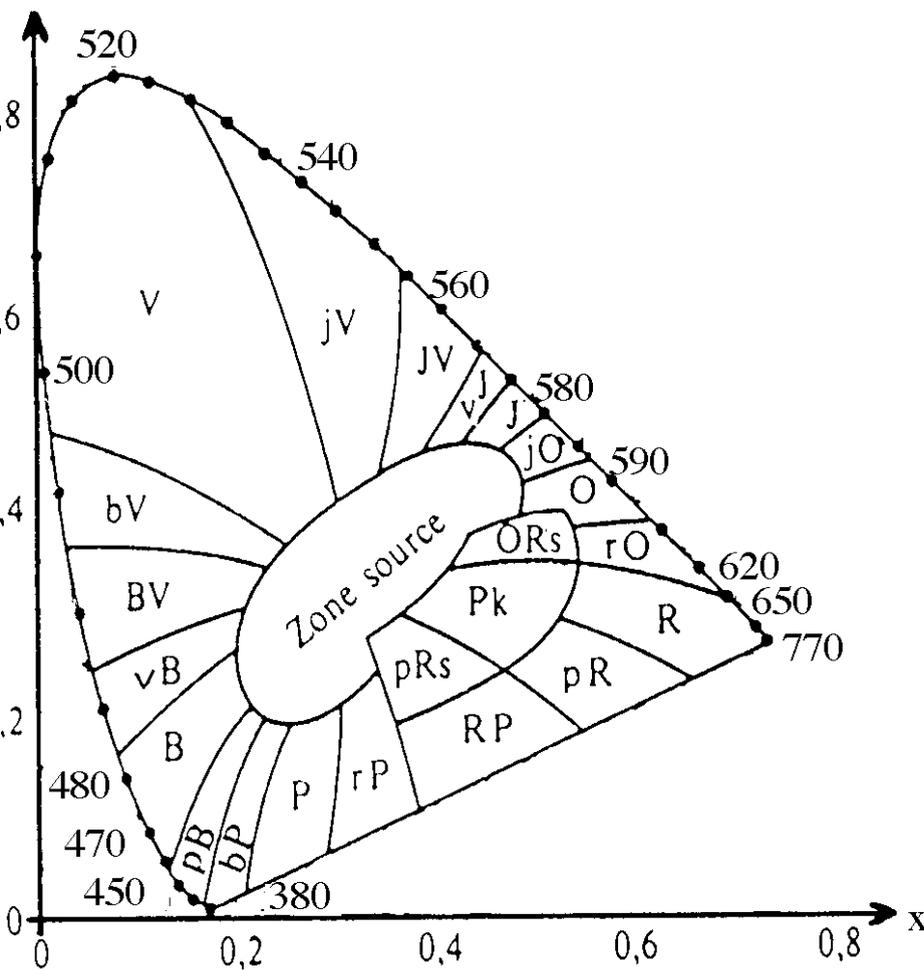
B = soleil au méridien

C = ciel couvert à midi

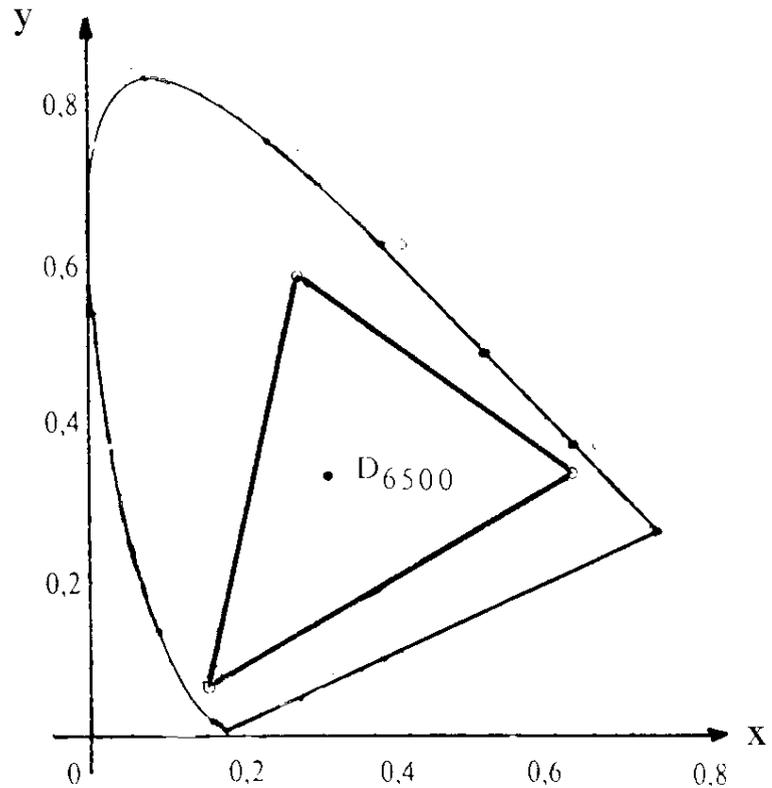
D = blanc pour télévision

utilisation du diagramme :

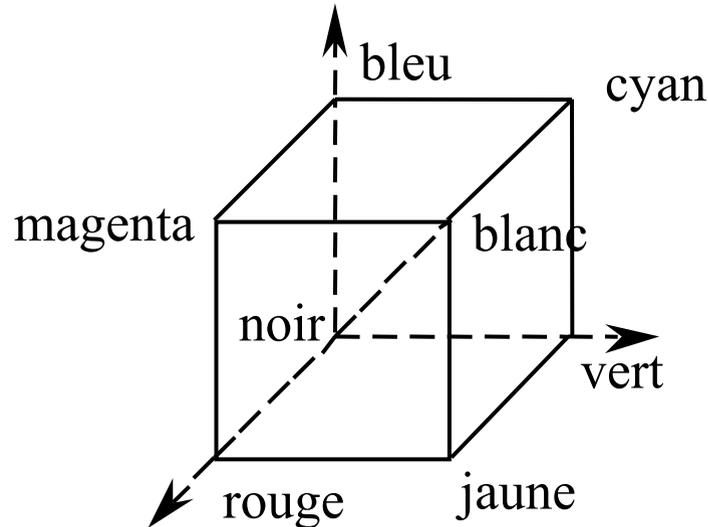




un moniteur couleur ne peut reproduire toute l'étendue de la gamme des couleurs du spectre visible :



3.3 - Le système RVB



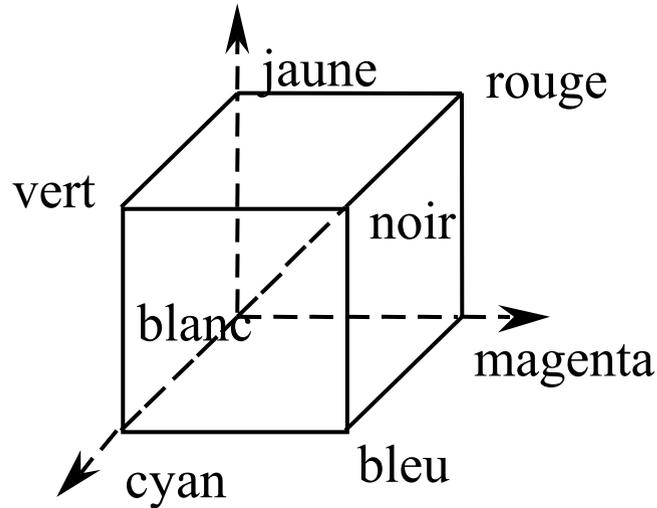
avantages :

- utilisé sur les moniteurs couleurs
- naturel

inconvénients :

difficile à utiliser car n'appartient pas au domaine du perceptible

3.4 - Le système CMJ



avantages :

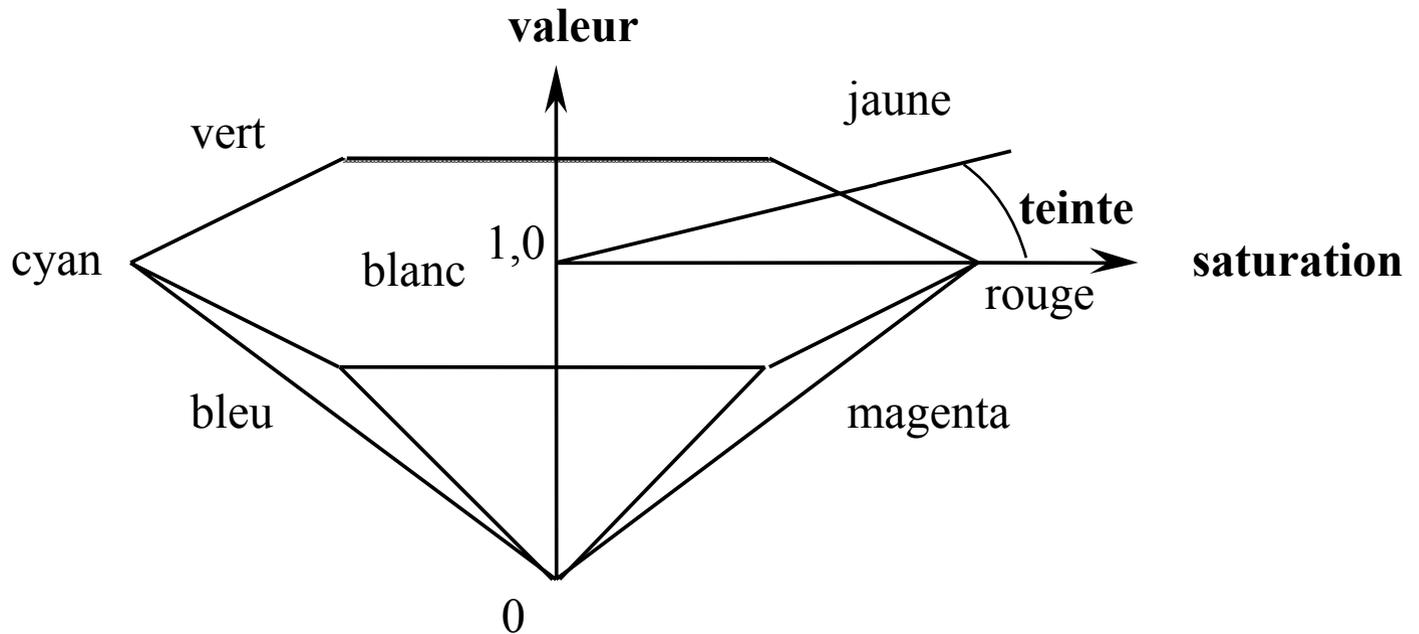
- utilisé sur les imprimantes couleurs
- naturel

inconvénients :

difficile à utiliser car n'appartient pas au domaine du perceptible

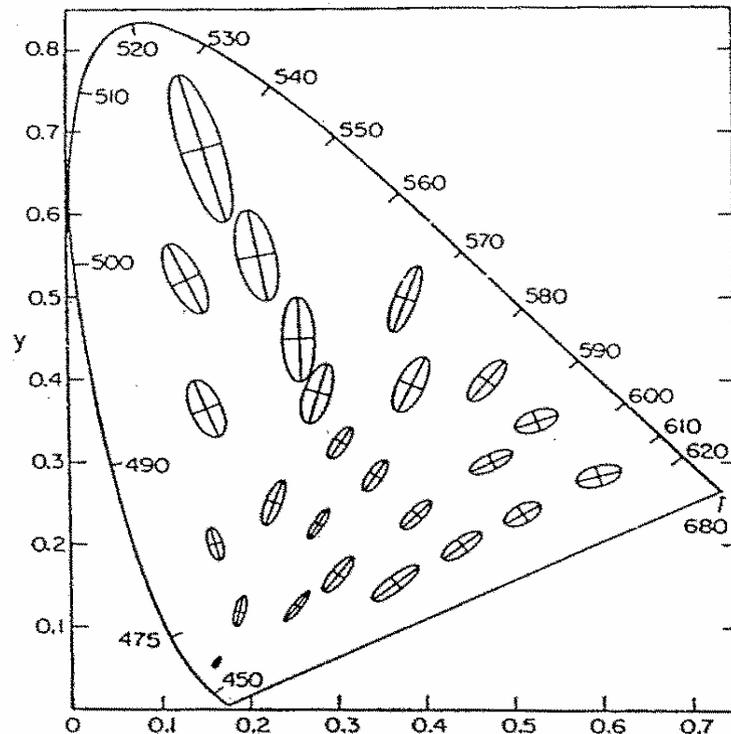
3.5 - Le système TSV

basé sur un modèle subjectif de couleurs



3.6 Le modèle CIELUV

- la distance euclidienne dans le repère XYZ ne coïncide pas avec la perception des différences entre couleurs que l'on peut percevoir



➤ deux espaces normalisés par la CIE en 1976 :

– Le modèle CIELuv

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

$$v = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

$$L = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_w}} - 16 \quad \text{si } \frac{Y}{Y_w} > 0.01$$

$$L = 909.3 \frac{Y}{Y_w} \quad \text{sinon}$$

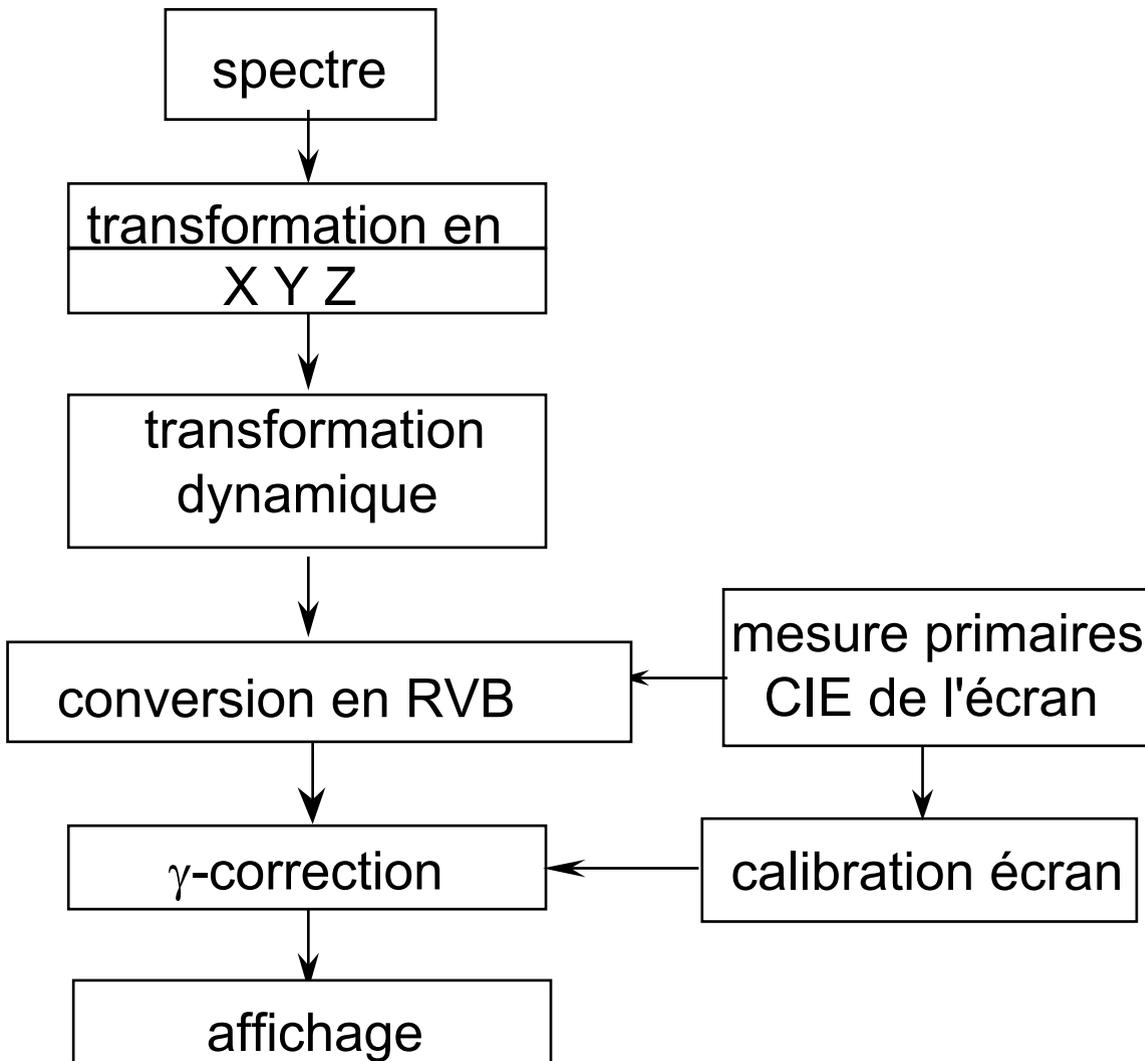
$$u^* = 13 L(u - u_w)$$

$$v^* = 13 L(v - v_w)$$

$$\Rightarrow \text{distance } \Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}$$

– Le modèle CIELab

4 - Echantillonnage d'un spectre



4.1. Reproduction de tons = transformation dynamique

problème :

calculs de rendu => luminances «réelles»

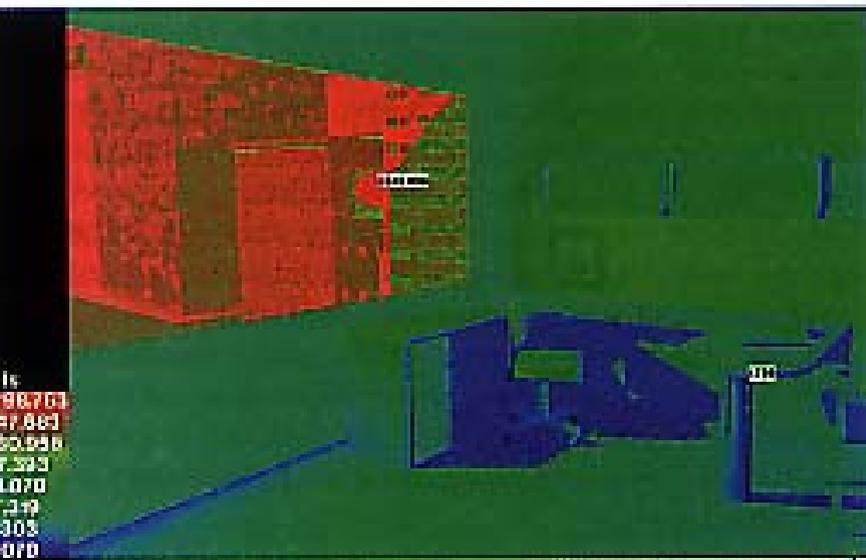
or

luminances réelles : $10^{-6} \rightarrow 10^4 \text{ cd/m}^2$

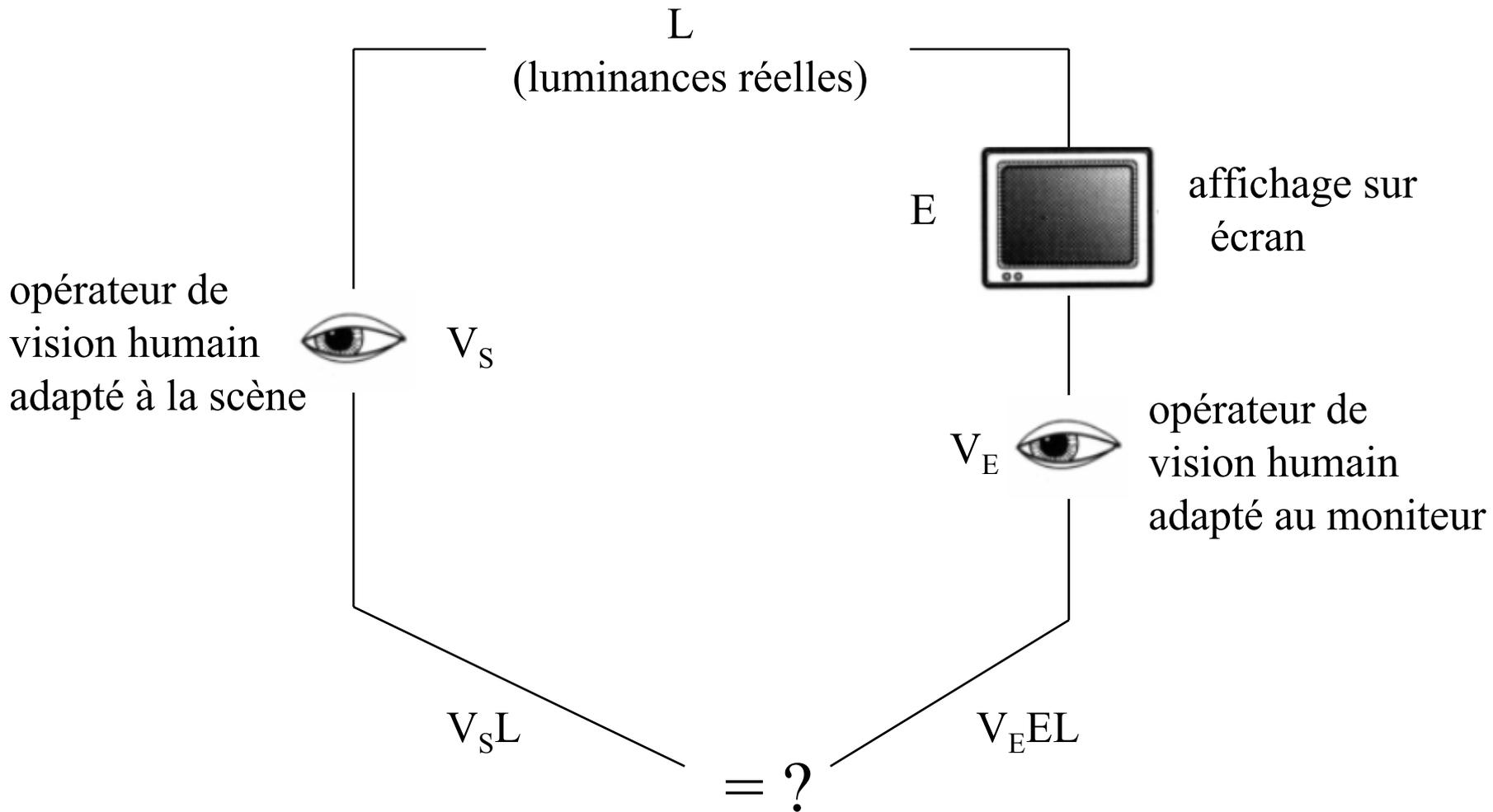
nuit sans lune : $3 \cdot 10^{-5} \text{ cd/m}^2$

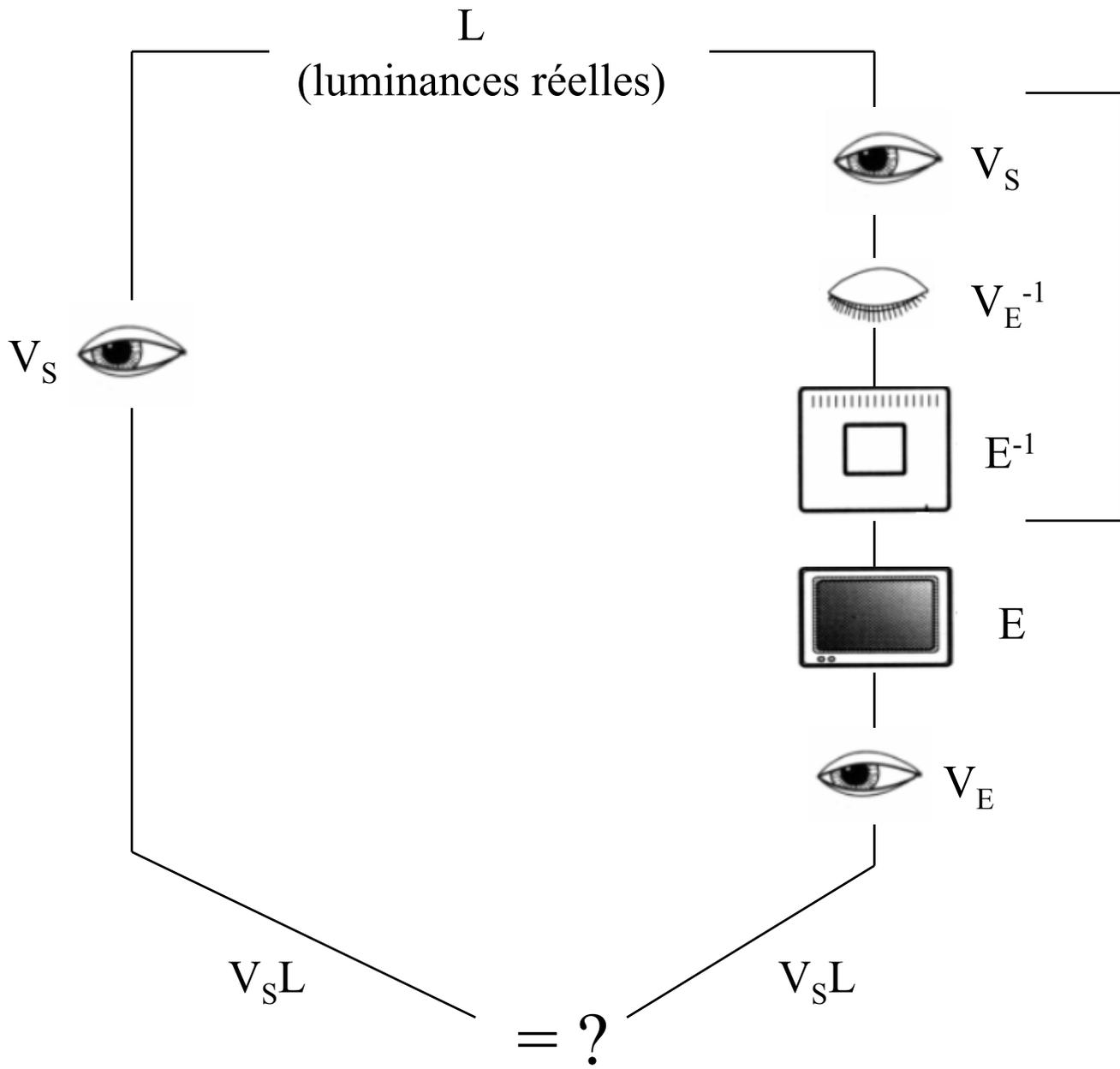
neige en plein soleil : $16\,000 \text{ cd/m}^2$

moniteur : 1 $\rightarrow 100 \text{ cd/m}^2$



formalisation du problème :





opérateur de
reproduction de
tons

données expérimentales :

le système visuel n'est pas sensible aux intensités lumineuses, mais aux changements d'intensité

adaptation en luminance

seuil différentiel de luminance :

si une cible a une luminance $L_f + \Delta L_f$ sur un fond de luminance L_f , elle sera discernable

si elle a une luminance $L_f + \varepsilon$, avec $\varepsilon \leq \Delta L_f$, elle ne le sera pas

loi de Weber (début du siècle):

$$\frac{\Delta L}{L} \cong 0.02$$

travaux de Blackwell (début des années 70):

$$\Delta L = 0.054 \left(1.219 + L_f^{0.4} \right)^{2.5}$$

travaux de Stevens et Stevens (1963) :

luminosité : attribut caractérisant la sensation visuelle de lumière et son niveau → le Brill

$$B = 10^{\beta} L^{\alpha}$$

avec

$$\alpha = 0.4 \log_{10} (L_f) + 2.92$$

$$\beta = -0.4 (\log_{10} (L_f))^2 - 2.584 \log_{10} (L_f) + 2.0208$$

où L_f est la luminance de fond

□ méthode de Ward (1994)

idée : utiliser le seuil différentiel de perception

basée sur la formule de Blackwell

Ward cherche une relation linéaire entre les seuils :

$$\Delta L_E = m \Delta L_S$$

en utilisant la relation de Blackwell, on obtient

$$m = \left(\frac{1.219 + L_{FE}^{0.4}}{1.219 + L_{FS}^{0.4}} \right)^{2.5}$$

d'où

$$L_E = \left(\frac{1.219 + L_{FE}^{0.4}}{1.219 + L_{FS}^{0.4}} \right)^{2.5} L_S$$

L_{FS} est obtenue par une moyenne des luminances de la scène (ou d'une zone de la scène)

L_{FS} ne peut avoir qu'une valeur arbitraire : $L_{\text{max-écran}}/2$