

CES PAGES SONT DESTINÉES À FACILITER LA PRISE DE NOTES. ELLES SONT PRODUITES AUTOMATIQUEMENT À PARTIR DU SOURCE L^AT_EX/BEAMER DU DIAPORAMA SERVANT DE SUPPORT DE COURS. LA PRÉSENTATION ET LA MISE EN PAGE SONT PAR CONSÉQUENT APPROXIMATIVES.

Partie A — thème 2

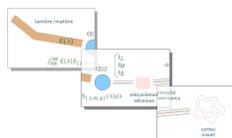
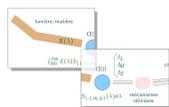
Formation et perception des couleurs

« *Indeed rays, properly expressed, are not colored.* »

Newton

1 De la lumière à la couleur

— Rappel : la formation des images, et donc celle des couleurs, résulte de la conjonction de trois processus :



- phénomène **physique**
 - rayonnement électromagnétique
 - interaction lumière/matière
- mécanisme **physiologique**
 - photorécepteurs de la rétine
 - cellules ganglionnaires (neurones)
- traitement **psychovisuels**
 - cortex visuel

2 Le phénomène physique

2.1 Longueur d'onde et énergie

Information lumineuse : photons

- vitesse c
- fréquence $u \leftrightarrow$ longueur d'onde λ (distance parcourue durant une période) :

$$\lambda = cT = \frac{c}{u}$$

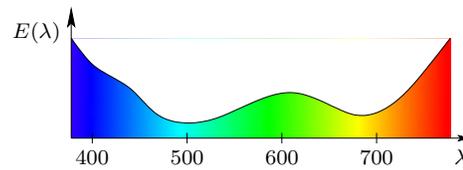
- fréquence $u \leftrightarrow$ énergie E

$$E = hu \quad (\text{constante de Planck})$$

Rayon lumineux : flux de photons

- énergie sur une longueur d'onde : $hu \times \text{nombre de photons}$
- DSE : répartition de l'énergie (densité de photons) sur le spectre visible

$$E(\lambda) : [380nm, 780nm] \rightarrow \mathbb{R}$$



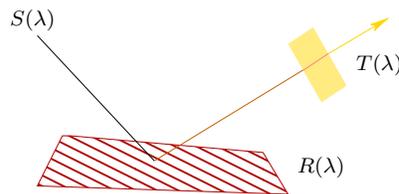
2.2 Interactions lumière-matière

- $S(\lambda)$: source lumineuse
- $R(\lambda)$: réflectance d'une surface

$$R(\lambda) : [\lambda_{min}, \lambda_{max}] \rightarrow [0, 1]$$

- $T(\lambda)$: transmittance d'un filtre

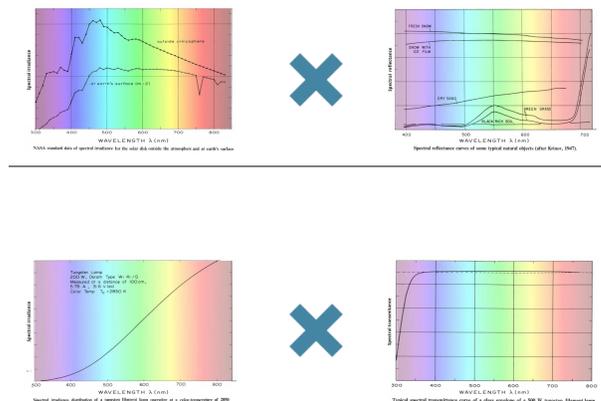
$$T(\lambda) : [\lambda_{min}, \lambda_{max}] \rightarrow [0, 1]$$



- interactions :

$$S(\lambda) \times R(\lambda) \times T(\lambda) \dots$$

⇒ les couleurs perçues dépendent des caractéristiques de la source lumineuse

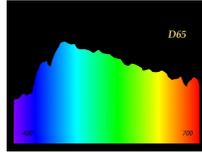


— G. Wyszecki and W.S. Stiles, Color Science

2.3 Caractérisation de sources lumineuses par des illuminants standards

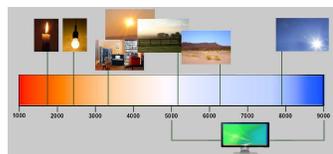
- DSE normalisées d'une trentaine de technologies de sources lumineuses
- définies numériquement : utilisables en imagerie numérique

- quelques exemples :
 - D65 : photo (lumière extérieure midi)
 - D50 : imprimerie (lumière intérieure)
 - D55 : intermédiaire
 - E : distribution uniforme (égale énergie)



2.4 Caractérisation des sources lumineuses par une température

- repose sur le modèle physique du **corps noir**
 - modèle établie par Planck en 1900
 - corps noir : corps idéal absorbant tous les rayonnements électromagnétiques
 - expression de la DSE $E_T(\lambda)$ de la **lumière émise par un corps noir chauffé** à la température T
 - permet de caractériser les **sources lumineuses visibles** \leftrightarrow rayonnements thermique
 - flamme, filament chauffé, réaction nucléaire du soleil, etc
 - corrélation température T / couleur de la source lumineuse visible de DSE $E_T(\lambda)$
- intérêt des **températures de couleur**
 - certaines sources se comportent physiquement comme des corps noir (e.g. le soleil)
 - les autres en sont **visuellement proches** : approximation par une DSE $E_T(\lambda)$
 - **simplicité** de la représentation
 - référence pour le **calibrage de couleurs** : photographie, cinéma, éclairage, publication, etc.
- corrélation énergie / longueur d'onde
 - basses températures \rightarrow basses énergies \rightarrow hautes longueurs d'onde \rightarrow zone des rouges
 - hautes températures \rightarrow hautes énergies \rightarrow basses longueurs d'onde \rightarrow zone des bleus
- quelques températures de référence
 - 1500K - 2500K : bougie, lampe incandescente
 - 3000K - 4000K : lever ou coucher de soleil, éclairage intérieur chaud
 - > 5000K : lumière du jour
 - 6500K : éclairage naturel midi
 - 9000K : ciel bleu intense (jusqu'à 20000K et plus par ciel clair aux pôles)



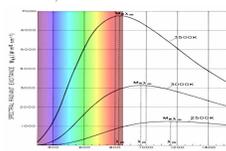
- 5000K/6500K/9000K : calibrage écrans
- expression de la **loi de radiation de Planck**

$$T \rightarrow E_T(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 (e^{hc/kT\lambda} - 1)}$$

T : température en degrés kelvins

λ : longueur d'onde

h, k, c : constantes physiques (cte de Planck, cte de Boltzmann, vitesse de la lumière)



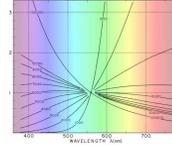
— en pratique, on peut utiliser

$$E_T(\lambda) = \alpha_T \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} c_1 = 3.7415 \cdot 10^{29} \\ c_2 = 1.4388 \cdot 10^7 \end{cases}$$

— par convention, on normalise $E_T(\lambda)$ à 1 pour $\lambda = 560 \text{ nm}$:

$$E_T(560) = \alpha_T \frac{c_1}{560^5 (e^{c_2/560T} - 1)} = 1$$

$$\Rightarrow \alpha_T = \frac{1}{\frac{c_1}{560^5 (e^{c_2/560T} - 1)}} = \frac{560^5 (e^{c_2/560T} - 1)}{c_1}$$



3 Le mécanisme physiologique

3.1 Les photorécepteurs de la rétine.

Capteurs caractérisés par une **courbe de sensibilité**

- $s(\lambda) : [380, 780] \rightarrow [0, 1]$
- $s(\lambda)$ exprime la sensibilité du capteur à la longueur d'onde λ

Exemples :

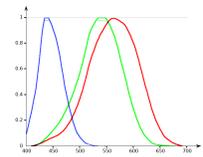
- $s(\lambda) = 0, \forall \lambda$: capteur inactif
- $s(\lambda) = 1, \forall \lambda$: capteur neutre
- $s(\lambda) = 1, \forall \lambda < 550 \text{ nm}$ et 0 sinon : capteur sensible aux verts, bleus, violets
- **information mesurée** par le capteur s recevant une DSE $E(\lambda)$:

$$K \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E(\lambda) s(\lambda) d\lambda$$

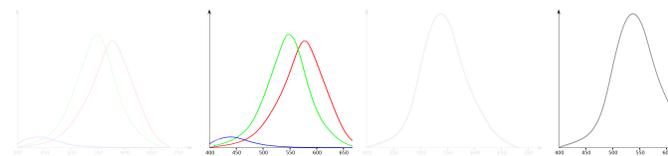
— mesure la **somme des énergies de E pondérées par s**

Caractérisation des capteurs de la rétine

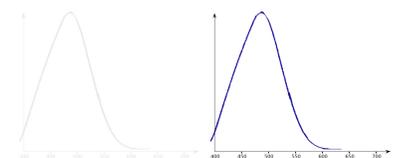
- sensibilité des **cônes** (vision diurne, ou photopique)
 - $\bar{l}(\lambda)$: sensibilité aux grandes longueurs d'onde
 - $\bar{m}(\lambda)$: sensibilité aux longueurs d'onde moyennes
 - $\bar{s}(\lambda)$: sensibilité aux petites longueurs d'onde
- caractérisation de la **luminance Y**
 - quantité de lumière perçue (photopique)
 - courbes pondérées par le nombre de capteurs de chaque type
 - Y : somme de ces trois fonctions
- sensibilité des **bâtonnets** (vision nocturne, ou scotopique)
 - monodimensionnel : vision monochrome
 - en absolu, sensibilité plus élevée
 - pic de sensibilité dans les basses longueurs d'onde



$\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$ et $\bar{s}(\lambda)$ normalisées à 1

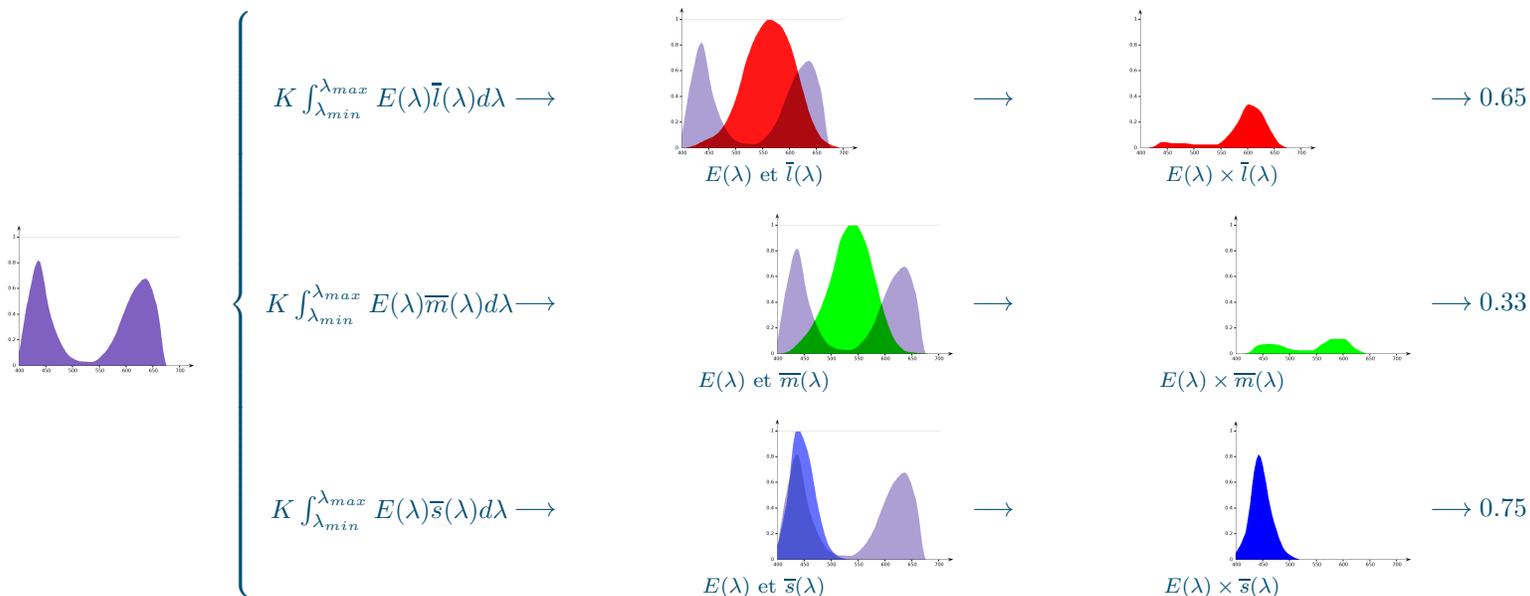


$\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$ et $\bar{s}(\lambda)$ pondérées $Y(\lambda)$



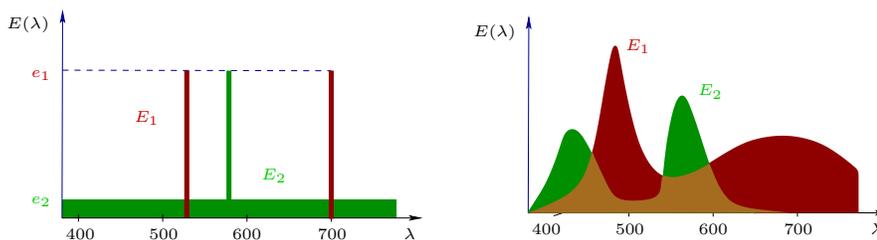
sensibilité des bâtonnets

exemple de simulation de mesure de DSE par les cônes (normalisation arbitraire du résultat)



Couleurs métamères

— $E_1 \neq E_2$ et les couleurs de E_1 et de E_2 perçues par le SVH sont identiques

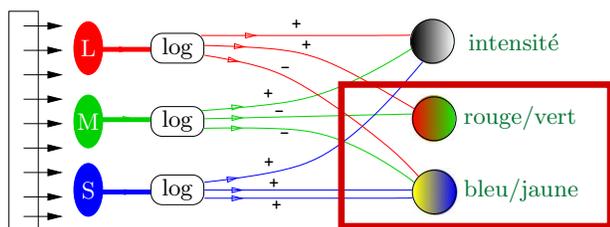


— importance de trouver un système de description des DSE qui capture cette propriété (voir thème suivant)

3.2 La sensation de couleur

Traitements rétiniens

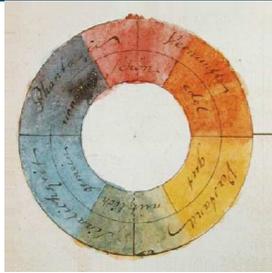
- sensation de couleur : traitement neuronal effectué par les cellules ganglionnaires de la rétine
- modèle antagoniste de Hering :



Teinte (Hue)

- attribut de la *sensation visuelle* par laquelle une surface apparaît similaire à l'une des couleurs *rouge, jaune, bleu et vert*, ou à une combinaison de *deux* d'entre elle.
- associée à une *longueur d'onde dominante*

Cercles chromatiques



Goethe (1809)



Chevreul (1839)

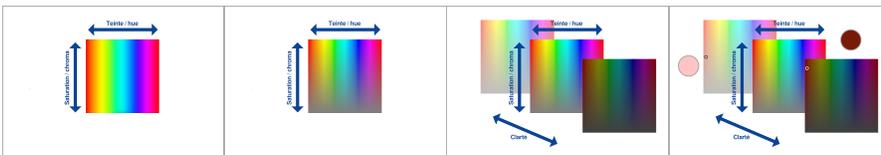
Saturation / chroma

- *intensité de coloration* par rapport à l'échelle des gris (neutres) – pureté, vivacité, etc.
- proportion de la *longueur d'onde dominante* dans la quantité totale de lumière

Clarté

- *intensité lumineuse, énergie totale, luminance Y*

De l'ordre d'un million de couleurs distinguables par le SVH standard



- exprimables en termes de **chrominance** (teinte, saturation) et **luminance** (clarté)
- seulement une **douzaine** de *catégories de couleurs* dans les langues humaines par les ethnologues
 - rouge, orange, jaune, vert, bleu, pourpre (mauve, violet)
 - rose, marron
 - blanc, noir, gris

3.3 Vision non standard

Absence d'un ou de deux types de cônes

- **daltonisme** : vision dichromatique
- **achromatopsie** : vision monochromatique



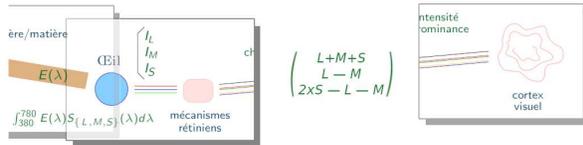
Vision tétrachromatique



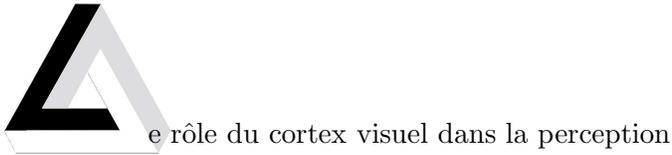
Comparing Concetta Antico's painting with the original scene could give a hint of the extra shades she is seeing — BBC Future.

- quatrième type de cône intermédiaire à L et M
- mutation chez certaines femmes (codage reposant sur les deux chromosomes X)
- plusieurs dizaines de millions de couleurs distinguables
- *Tetrachromacy project*, University of Newcastle

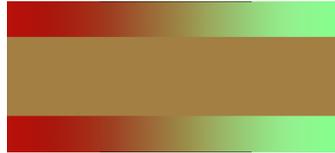
4 Traitement psychovisuels



Les informations visuelles construite par la rétine et les cellules ganglionnaires sont **interprétées par le cortex visuel** : couleurs, clartés, formes, détail/flou, mouvements, etc.



$$\begin{aligned} L' &= L'' \\ M' &= M'' \\ S' &= S'' \end{aligned}$$



$$C' \neq C''$$

- CF thème « Traitements basés sur la perception »