



La vision et ses différents aspects

Emmanuel DUMONS, Enseignant Physique INSA CVL
emmanuel.dumons@insa-cvl.fr

Plan :

- A. Éléments de photométrie**
- B. Photométrie visuelle**
- C. Vision des couleurs**
- D. Sensibilité aux contrastes**

A. Éléments de photométrie

A.1) Généralités

A.2) Flux énergétique

A.3) Émission de rayonnement

A.4) Interaction rayonnement – matière

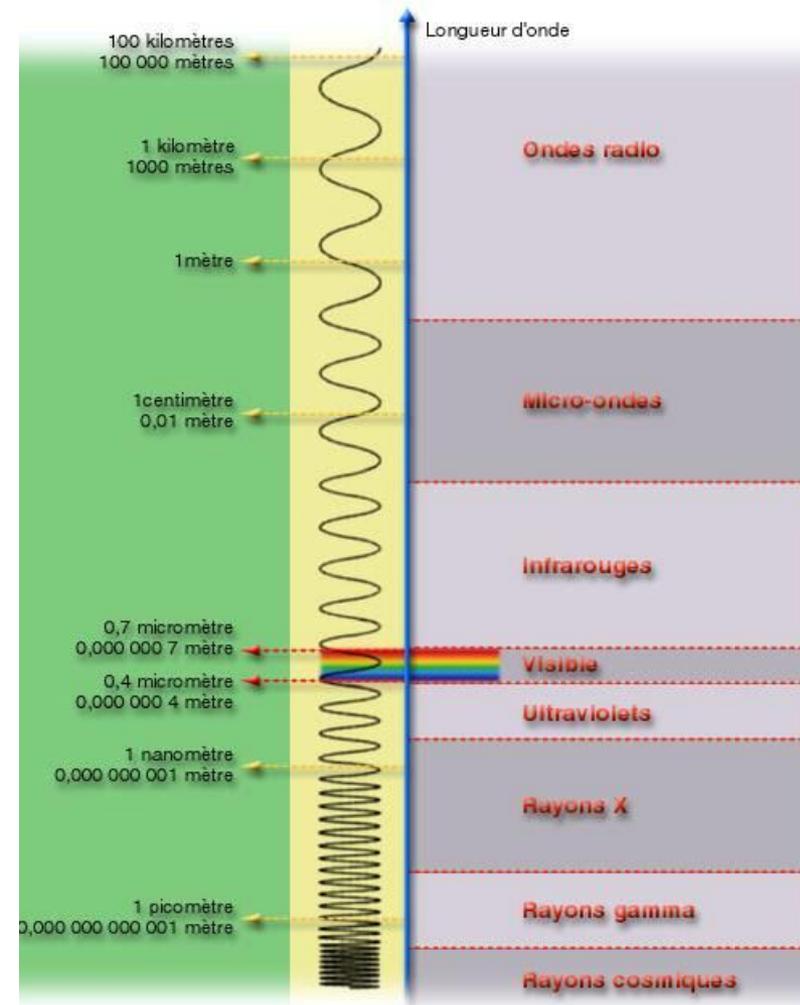
A.5) Éclairement d'une surface

A.6) Appareils de mesure

A.1) Généralités

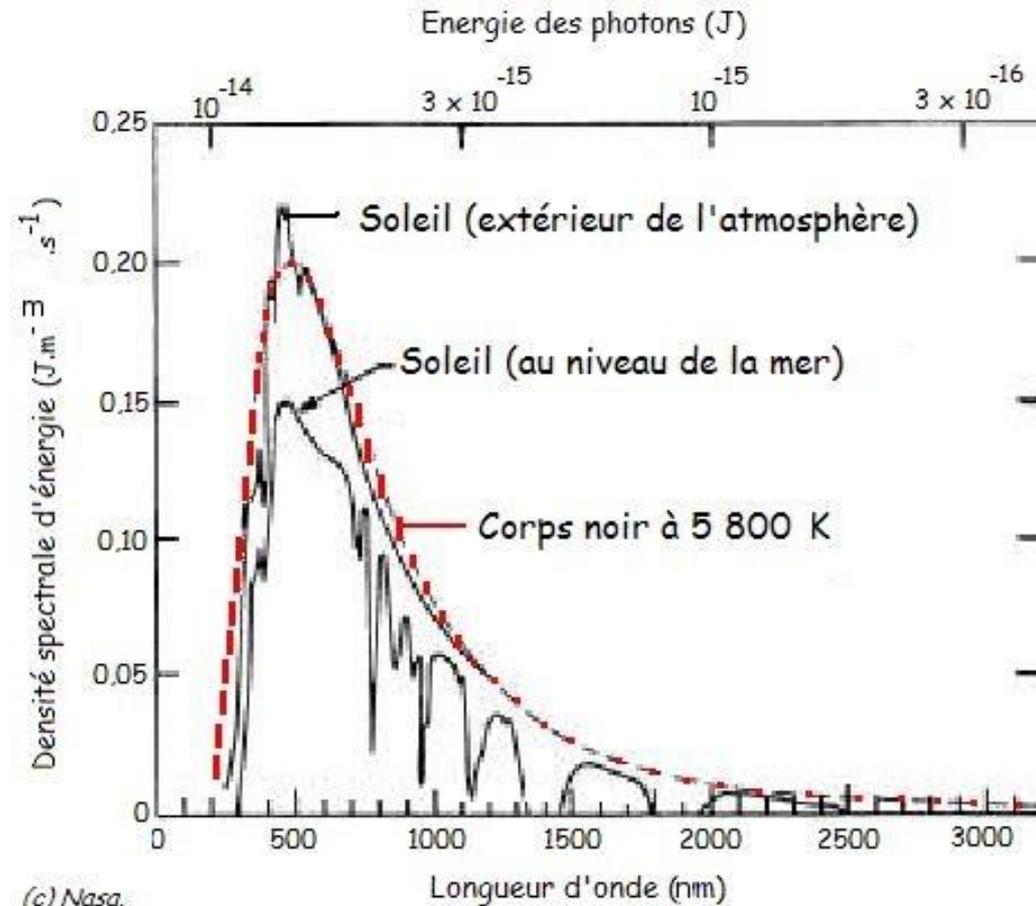
- **Radiométrie** : science qui étudie la mesure de l'énergie produite par une source de radiations électromagnétiques

Radiomètre
de Crookes



A.1) Généralités

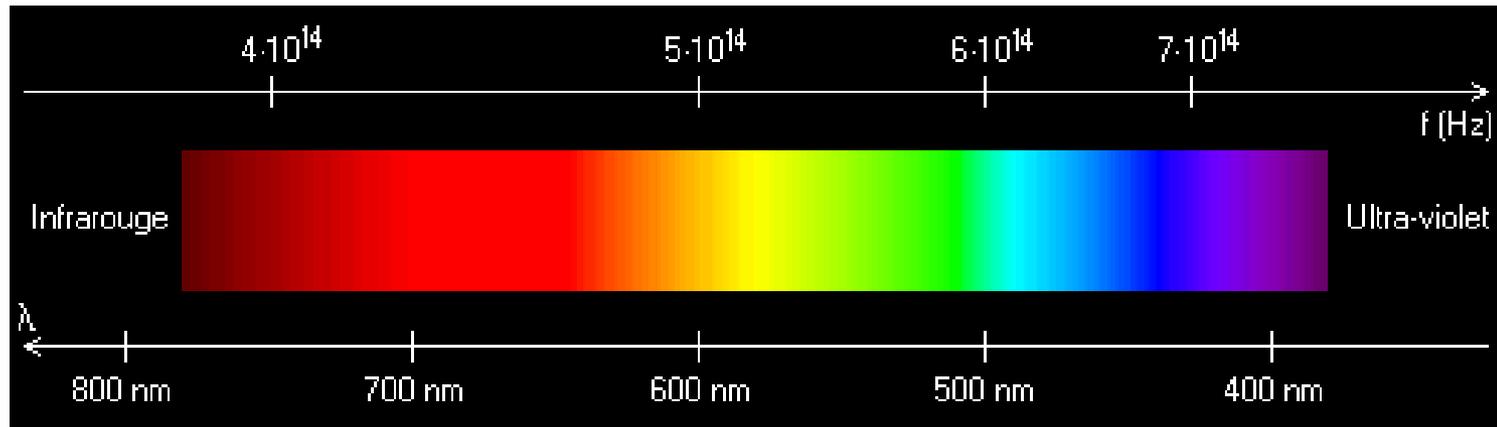
- **Photométrie énergétique** concerne plus précisément les rayonnements des domaines du visible, des UV et des IR



Émission énergétique du Soleil

A.1) Généralités

- **Photométrie visuelle** étudie les effets des radiations lumineuses (entre 380 et 780 nm) sur le système visuel.



A.1) Généralités

- **Source lumineuse** ↔ **stimulus visuel**
caractérisé par **plusieurs grandeurs physiques**
telles que :
 - longueurs d'onde émises,
 - flux énergétique émis,
 - aspects spatiaux et temporels...



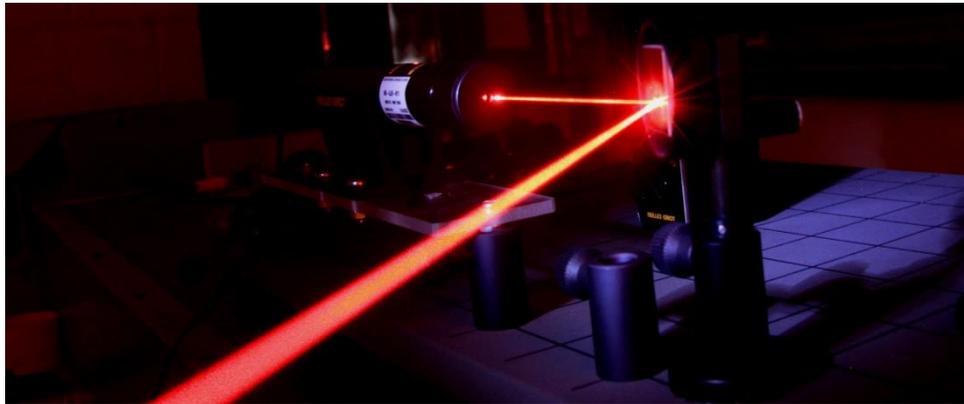
A.1) Généralités

- **Grandeur physique ↔ Sensation corticale**
- **Perception visuelle** : intégration de différentes sensations corticales en provenance de la source :
 - sensation lumineuse,
 - sensation colorée,
 - sensation de mouvement,
 - sensation de relief,
 - sensations de dimension et de durée...



A.2) Flux énergétique

- **Énergie électromagnétique** contenue dans un rayonnement : U_{em} en Joule (J)
- **Flux énergétique** ou **puissance** du rayonnement (énergie qui traverse une surface S par unité de temps) : $\Phi = \frac{dU_{em}}{dt}$ en Watt (W)

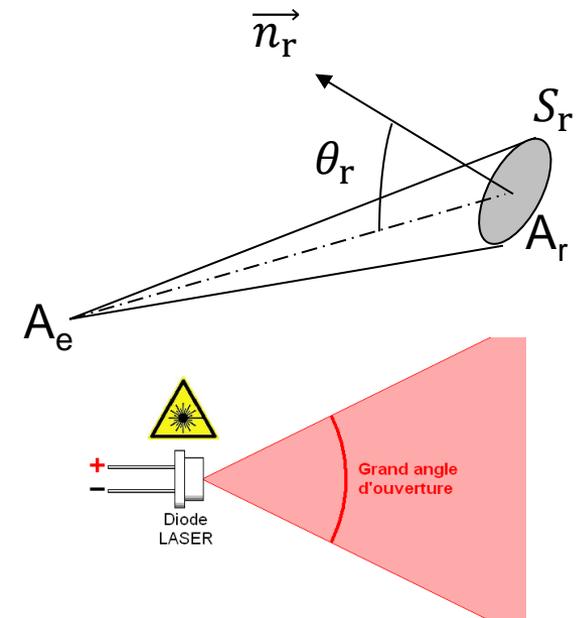


A.3) Émission de rayonnement

- Propriétés d'émissivité d'une **source ponctuelle** selon une direction x donnée autour d'un angle solide Ω_r :

$$\mathcal{J}(x) = \frac{d\Phi_e}{d\Omega_r}$$

\mathcal{J} : **intensité énergétique**
en $W.sr^{-1}$



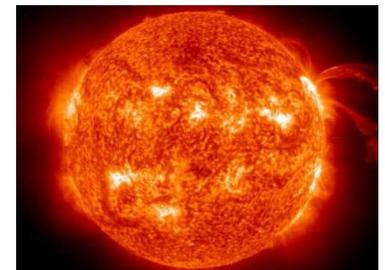
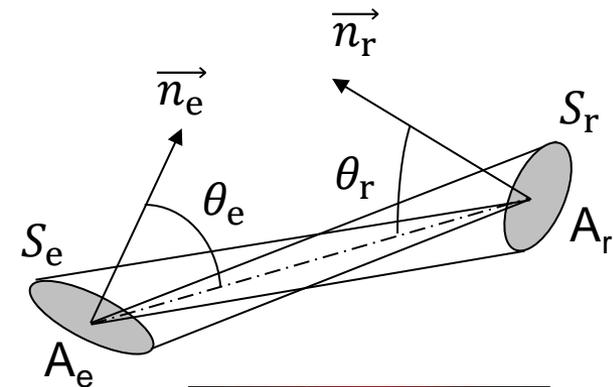
- Cas d'une source ponctuelle isotrope : $\mathcal{J} = \frac{\Phi_e}{4\pi}$

A.3) Émission de rayonnement

- Propriétés d'émissivité d'une **source étendue** à une surface S_e centrée au point A_e selon une direction x donnée en lien avec une étendue géométrique G :

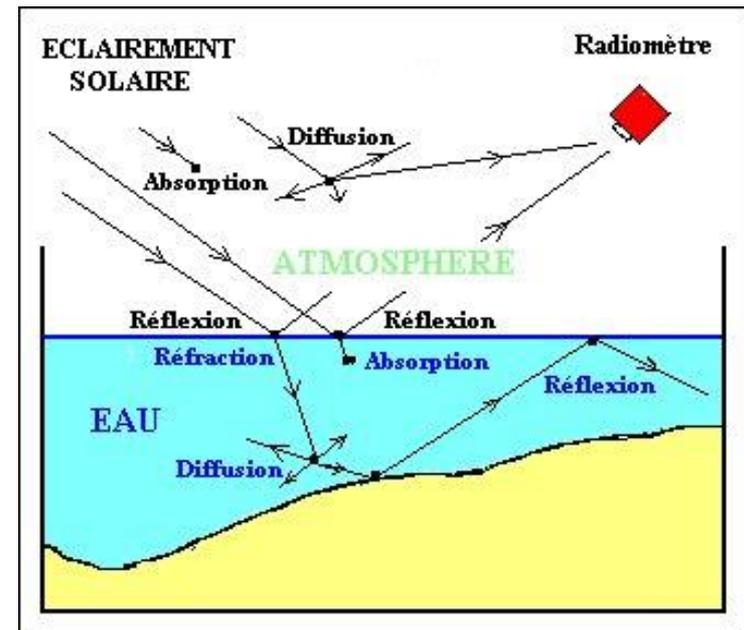
$$\mathcal{L}(A_e, x) = \frac{d\Phi_e}{dG}$$

\mathcal{L} : **luminance énergétique**
en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$



A.4) Interaction rayonnement - matière

- **Transmission**
- **Absorption**
- **Diffusion**
- **Réflexion diffuse** (grain de surface $\gg \lambda/4$) ou **spéculaire** (grain de surface $\leq \lambda/4$)
- **Réfraction**
- **Diffraction** (dimension obstacle $\approx \lambda$)



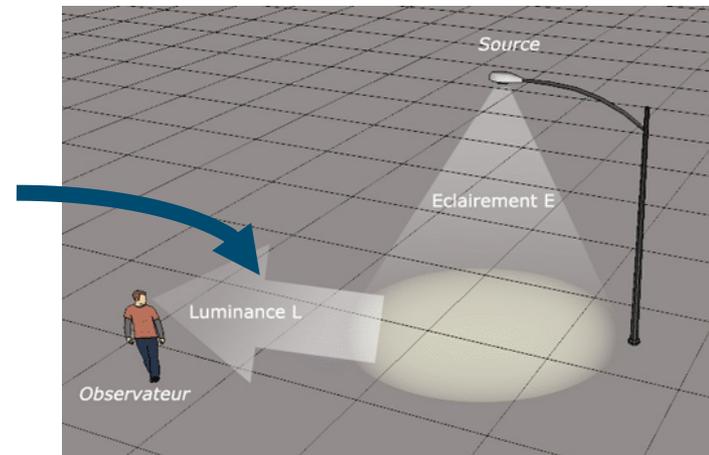
A.5) Éclairement d'une surface

- Éclairement d'une surface S_r centrée au point A_r :

$$\mathcal{E}(A_r) = \frac{d\Phi_r}{dS_r} \quad \text{avec } \Phi_r : \text{flux reçu}$$

\mathcal{E} : **éclairement énergétique** en W.m^{-2}

Propriétés de réflexion/diffusion des objets :
création de sources secondaires étendues



A.6) Appareils de mesure

- Intensité : Goniomètre →



- Luminance : Luminance-mètre →



- Flux : Sphère intégratrice →



- Eclairement : Luxmètre →



B. Photométrie visuelle

B.1) Sensibilité rétinienne

B.2) Passage énergétique → visuel

B.3) Domaines de la photométrie visuelle

B.1) Sensibilité rétinienne

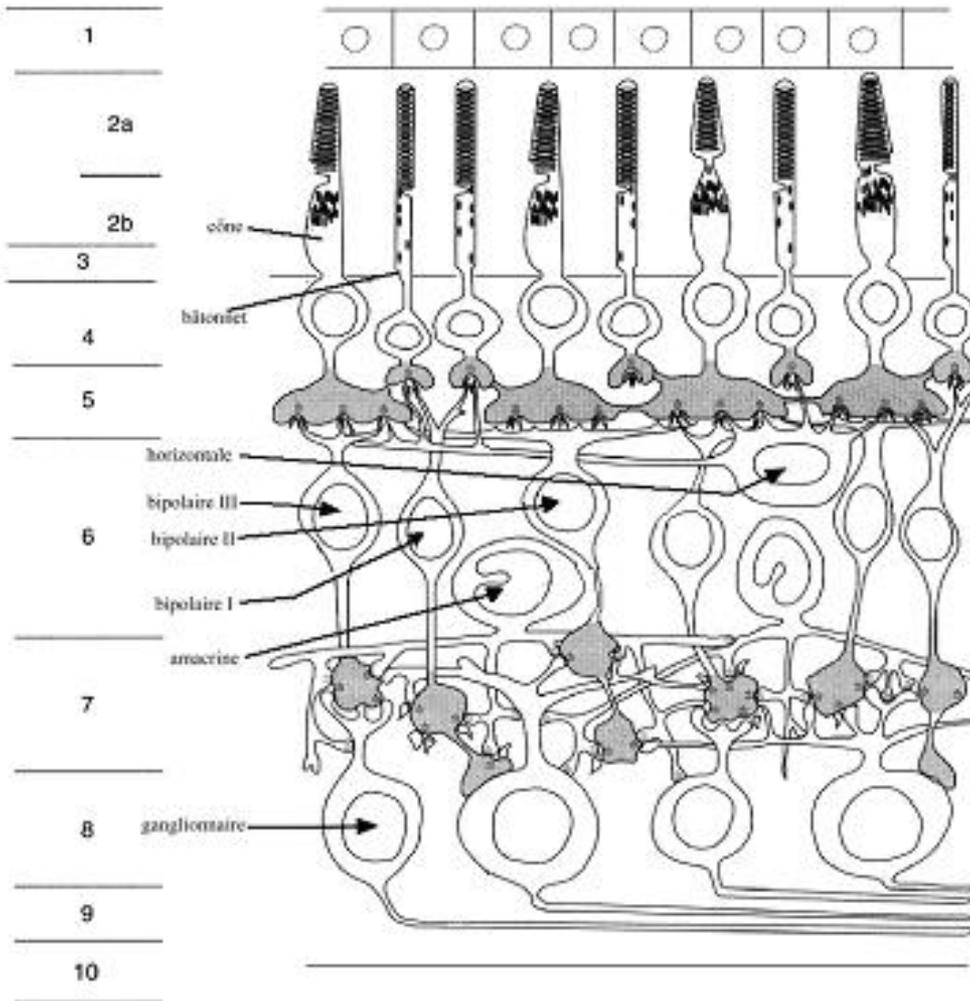
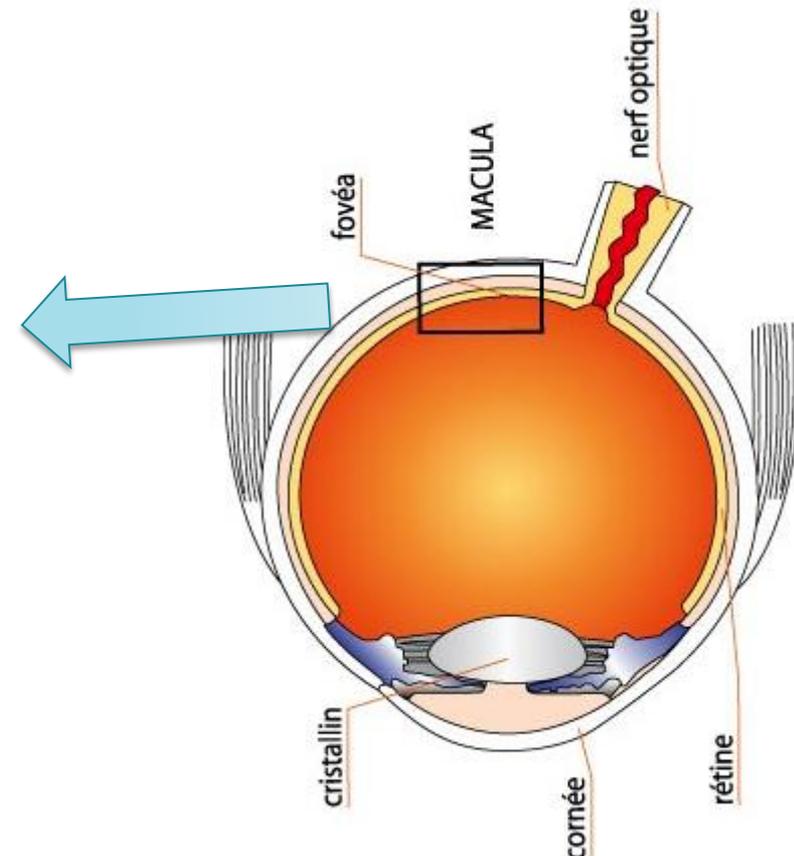


Schéma des 10 couches de la rétine



B.1) Sensibilité rétinienne

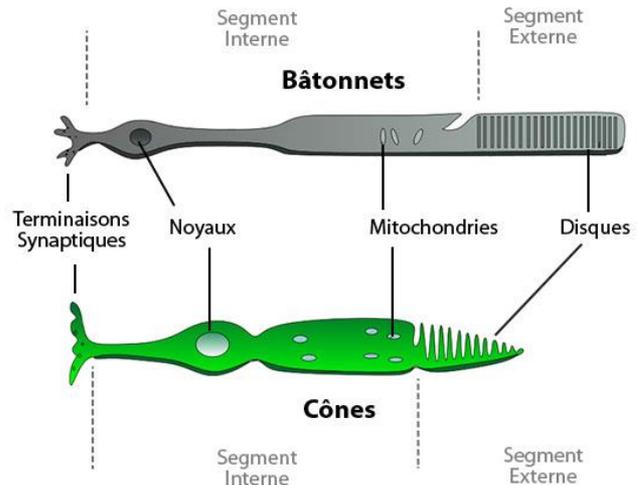
- 4 types de photorécepteurs sur la rétine :

- 1 type de bâtonnets

- 3 types de cônes :

- L (low-frequency)
- M (medium frequency)
- S (supra-frequency)

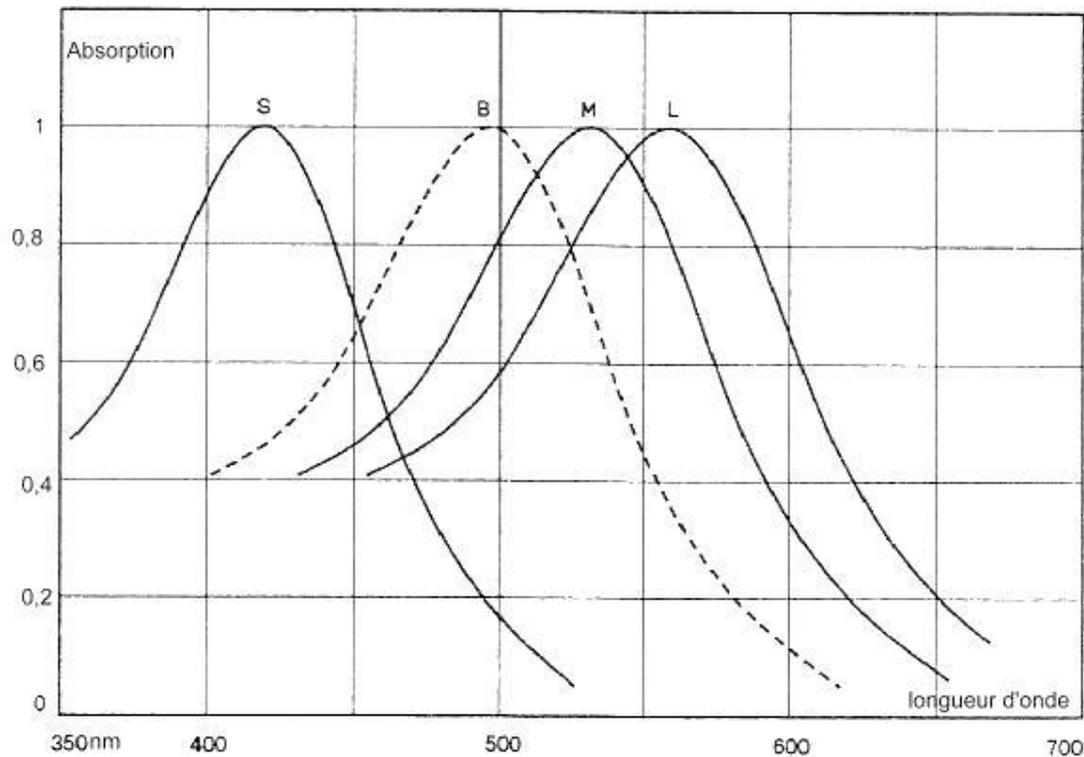
- Chaque type contient un pigment visuel spécifique :



Photorécepteurs	Bâtonnets	Cônes L	Cônes M	Cônes S
Pigments	Rhodopsine	Erythrolabe	Chlorolabe	Cyanolabe

B.1) Sensibilité rétinienne

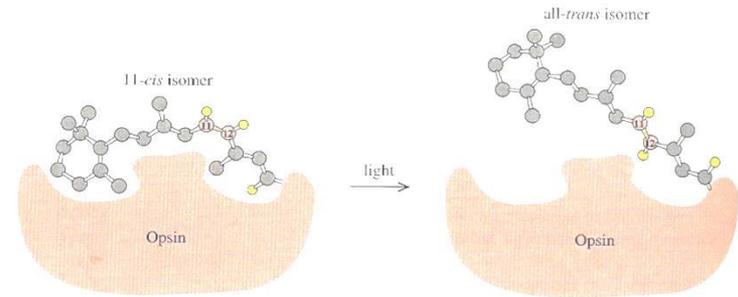
- Chaque pigment a sa propre **courbe d'absorption normalisée** :



B.1) Sensibilité rétinienne

- **Maximum d'absorption :**

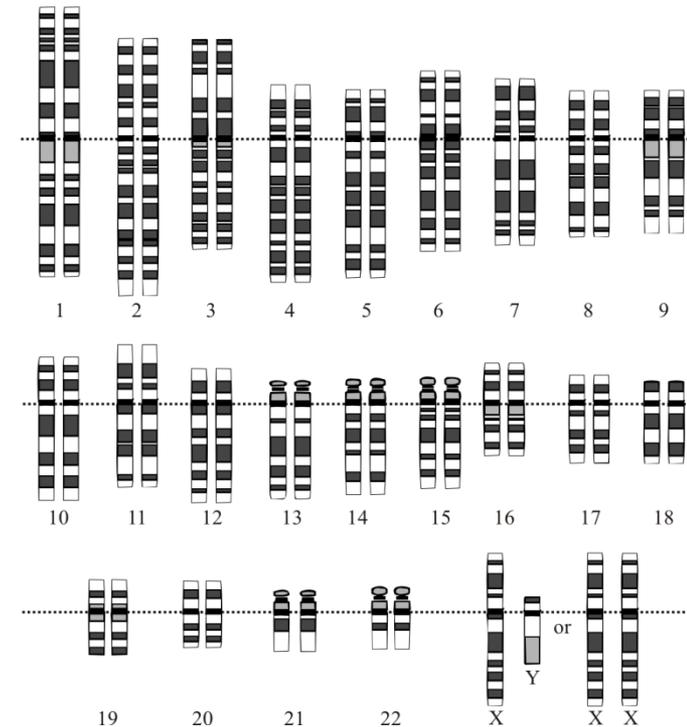
- 495 nm pour la rhodopsine,
- 430 nm pour le cyanolabe,
- 540 nm pour le chlorolabe
- 570 nm pour l'érythrolabe.



- C'est la partie commune « chromophore » (**rétinal**) des pigments visuels qui absorbe la lumière et la partie protéique (**opsine**) qui varie d'un pigment à l'autre

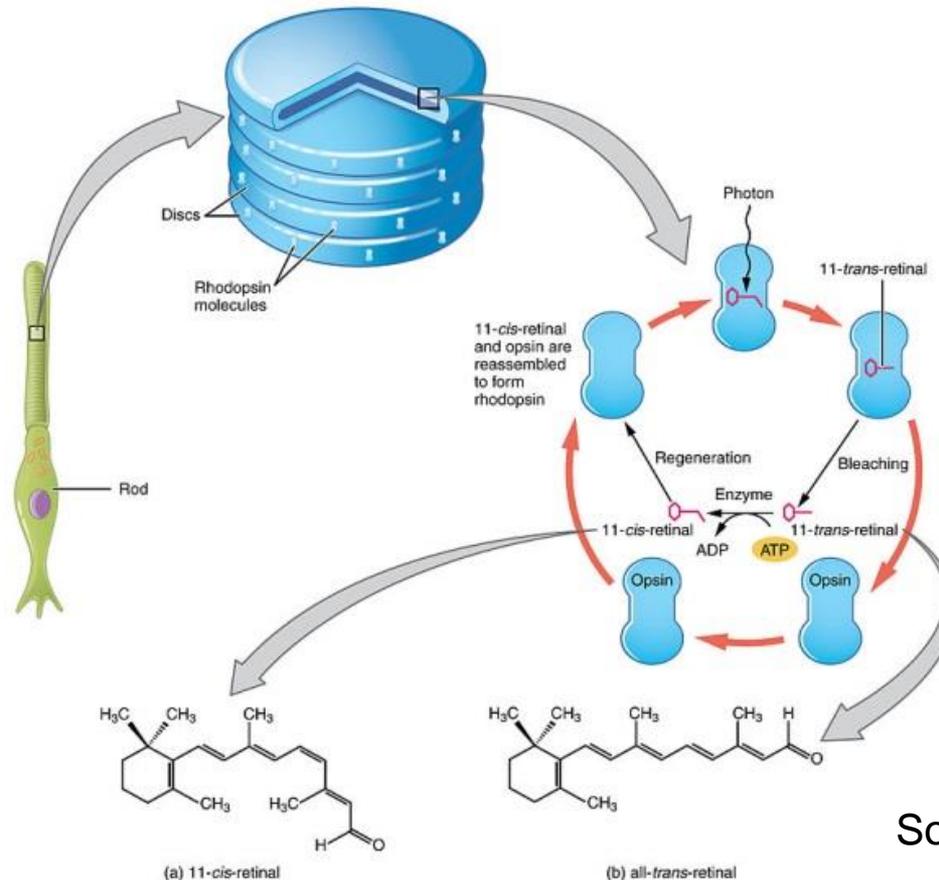
B.1) Sensibilité rétinienne

- Un peu de génétique...
- Les **4 opsines** sont codées par des gènes différents sur des chromosomes différents :
 - **Chromosome sexuel X** pour les opsines du **chlorolabe** et de l'**érythrolabe** (voir plus loin les anomalies héréditaires R/V)
 - **Chromosome autosome 7** pour l'opsine du **cyanolabe**
 - **Chromosome autosome 3** pour l'opsine de la rhodopsine



B.1) Sensibilité rétinienne

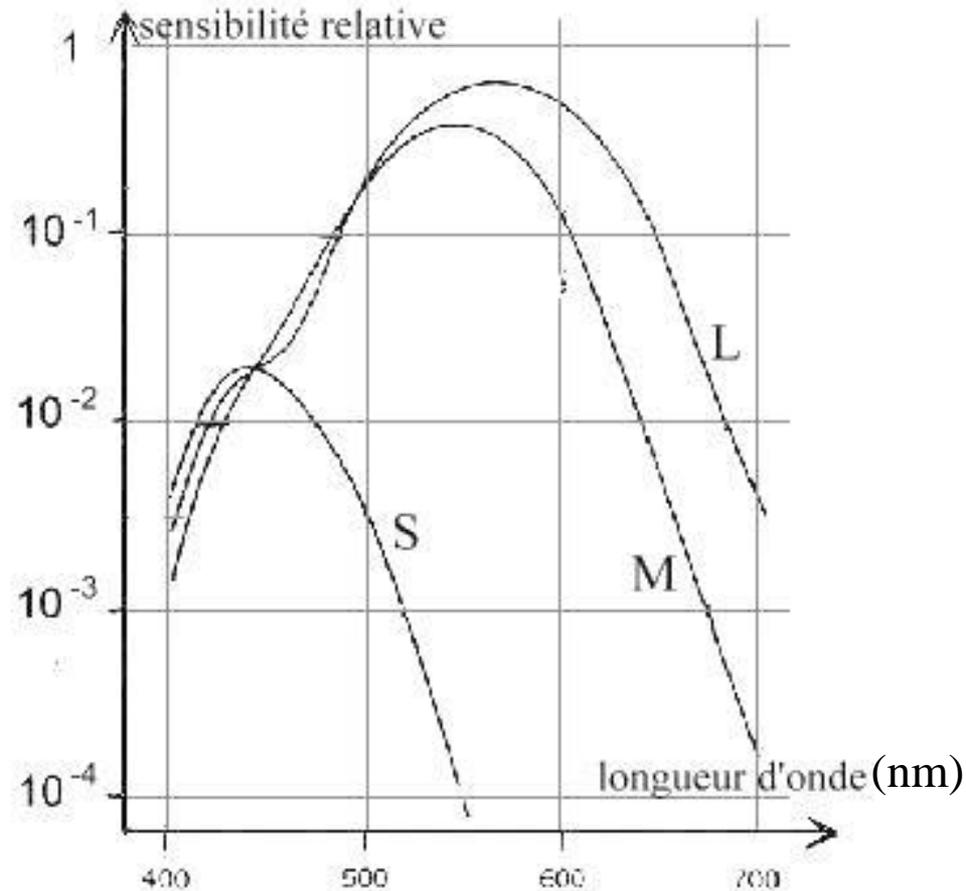
- **Cycle de Wald** (prix Nobel Médecine 1967) :



Source : OpenStax College

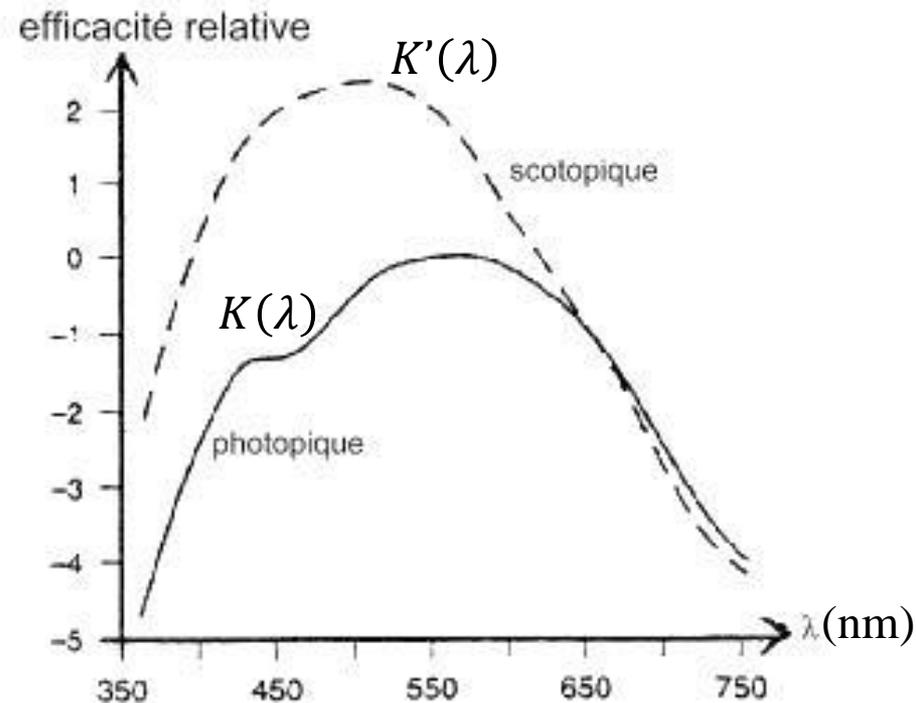
B.1) Sensibilité rétinienne

- Pour les cônes, on utilise des courbes de **sensibilités relatives spectrales** définies en fonction de :
 - leur courbe d'absorption,
 - leur proportion dans la rétine (cônes S peu nombreux : 10%).



B.1) Sensibilité rétinienne

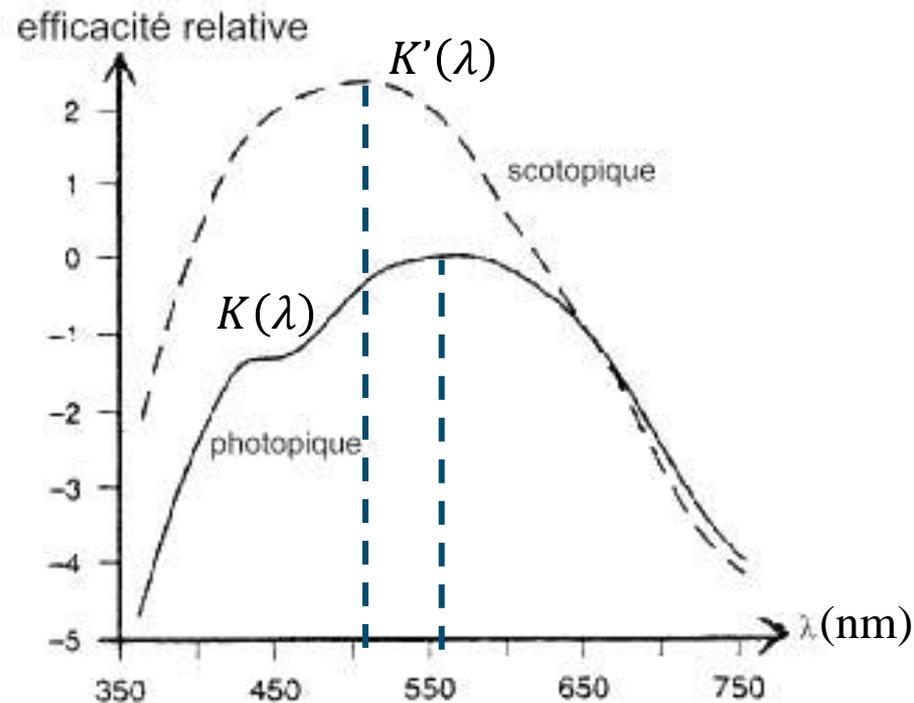
- Courbes d'**efficacité relative visuelle** :
 - **photopique $K(\lambda)$** pour les cônes : enveloppe des 3 courbes de sensibilités relatives spectrales
 - **scotopique $K'(\lambda)$** pour les bâtonnets : même courbe que sensibilité relative spectrale



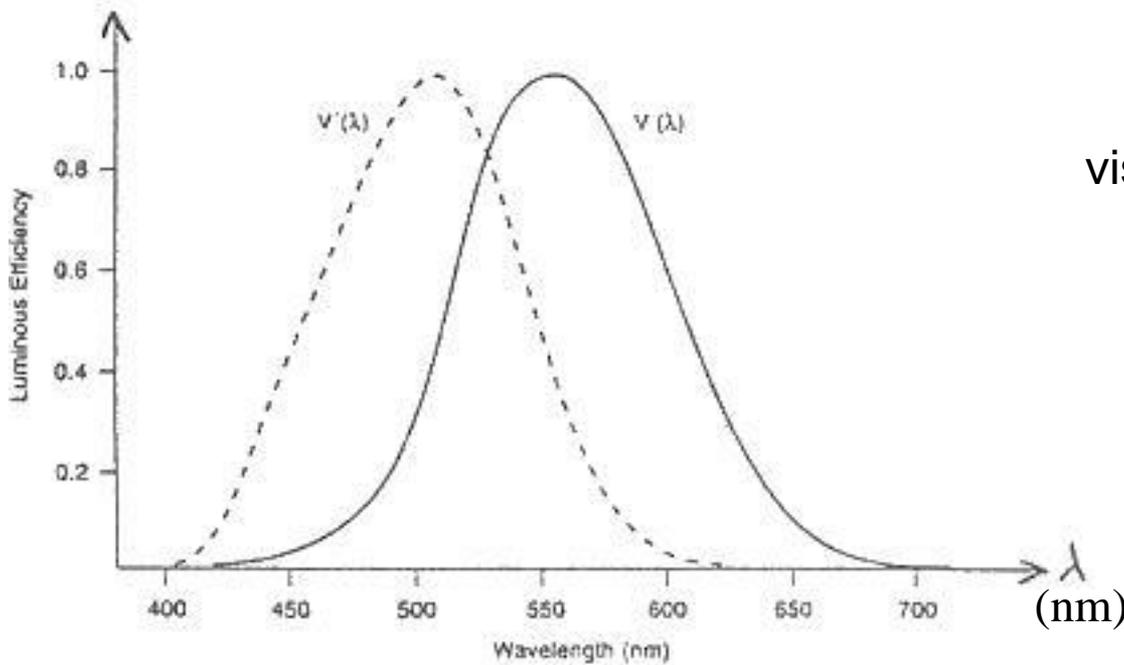
Remarque : les bâtonnets sont plus efficace que les cônes en relatif

B.1) Sensibilité rétinienne

- De jour (ambiance photopique) : seuls les cônes sont fonctionnels et le **maximum d'efficacité photopique** est à 555 nm : $K(555 \text{ nm}) = K_{\text{max}}$
- De nuit (ambiance scotopique) : seuls les bâtonnets sont fonctionnels et le **maximum d'efficacité scotopique** est à 505 nm : $K'(505 \text{ nm}) = K'_{\text{max}}$



B.1) Sensibilité rétinienne



Courbes d'efficacité visuelles normalisées à 1 pour leur maximum

- $V(\lambda)$: efficacité visuelle photopique
- $V'(\lambda)$: efficacité visuelle scotopique

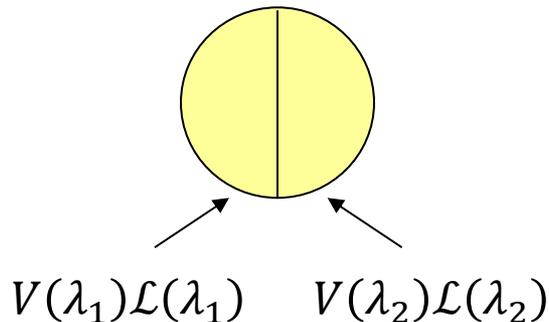
B.2) Passage énergétique → visuel

- Sensation lumineuse identique si :
$$V(\lambda_1)\mathcal{L}(\lambda_1) = V(\lambda_2)\mathcal{L}(\lambda_2)$$
- Par des mesures d'égalisation, on a :

$$L(\lambda) = K_{\max}V(\lambda)\mathcal{L}(\lambda)$$

L : luminance visuelle en cd.m^{-2}

cd : candela (unité du SI)



B.2) Passage énergétique → visuel

Luminance énergétique	\mathcal{L} en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$	→ Prise en compte de l'efficacité visuelle →	Luminance visuelle	L en cd.m^{-2}
Intensité énergétique	\mathcal{J} en W.sr^{-1}		Intensité visuelle	I en cd
Flux énergétique	Φ en W		Flux visuel	F en lm
Éclairement énergétique	\mathcal{E} en W.m^{-2}		Éclairement visuel	E en lx

B.3) Domaines de la photométrie visuelle

- Trois domaines de vision, en fonction du niveau de luminance ambiante :
 - **photopique (de jour)**
 - **scotopique (de nuit)**
 - **mésopique (intermédiaire ou crépusculaire)**

Objet	Soleil	Lampe projection	Seuil éblouissement	Flamme bougie	Seuil photopique	Seuil scotopique	Seuil perception
L (cd.m ⁻²)	2.10^{12}	2.10^7	10^4	5.10^3	10	10^{-3}	10^{-6}



B.3) Domaines de la photométrie visuelle

- Ces domaines ont été définis par la **Commission Internationale de l'Éclairage C.I.E.** (création en 1913)



International Commission on Illumination
Commission Internationale de l'Éclairage
Internationale Beleuchtungskommission

- Rôle : déterminer le vocabulaire international, les unités et les définitions normalisées utilisées en photométrie visuelle, mais également en matière d'éclairage et de colorimétrie.
- Unités de photométrie visuelle définies par rapport à un observateur de référence.

C. Vision des couleurs

C.1) Sensation colorée

C.2) Mélange de lumières colorées

C.3) Colorimétrie

C.4) Trichromatisme

C.5) Défauts vision des couleurs

C.1) Sensation colorée

- Couleur \leftrightarrow sensation colorée
- Notion de couleur reliée à :
 - physique,
 - physiologique,
 - psychologique,
 - technique,
 - artistique...
- En physique, 3 paramètres définissent une lumière colorée :
 - sa **luminance énergétique** \mathcal{L}
 - sa **longueur d'onde dominante** λ
 - sa **pureté** P : proportion de la luminance d'une longueur d'onde par rapport à la luminance d'un fond blanc



C.1) Sensation colorée

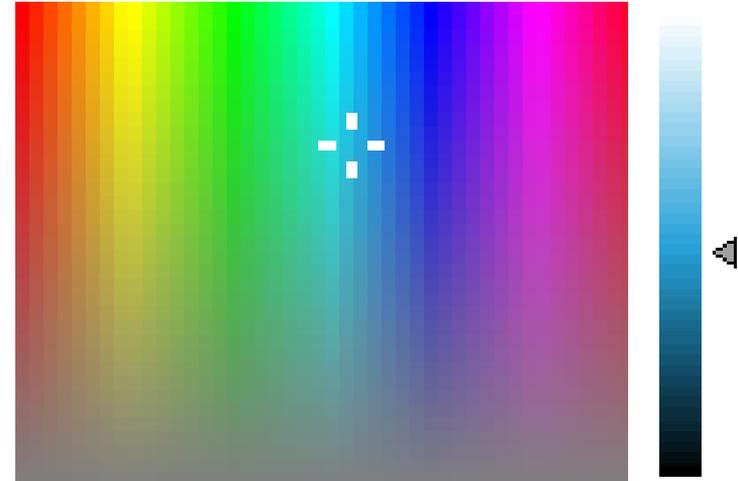
3 paramètres physiques \leftrightarrow 3 attributs physiologiques

- La **luminosité ou valeur** prend en compte l'efficacité visuelle (échelle du noir au blanc).
- La **teinte** est le résultat des réponses des cônes à la composition spectrale du stimulus.
- La **saturation ou chroma** est le pourcentage de teinte pure de même λ dominante qu'il faut ajouter à du blanc pour obtenir la même sensation colorée (calculé grâce au facteur de pureté p).

C.1) Sensation colorée

- **Systeme Munsell** : plus simple représentation des couleurs
- Album d'échantillons colorés construit par leurs 3 attributs physiologiques : TSL
- Teinte (Hue), Saturation (Chroma) et Luminosité (Value)

Couleurs :



Palette de couleurs :

TSL

Teinte :

141

Satur. :

179

Lum. :

123

C.2) Mélange de lumières colorées

- Mélange de 2 lumières colorées pures λ_1 et λ_2 crée au niveau cortical une sensation colorée de teinte λ (non présente initialement) :

$$L = L_1 + L_2 = L_\lambda + L_w$$

- L_λ : luminance de la teinte λ
- L_w : luminance du fond blanc

- Facteur de pureté du mélange : $p = \frac{L_\lambda}{L_\lambda + L_w}$

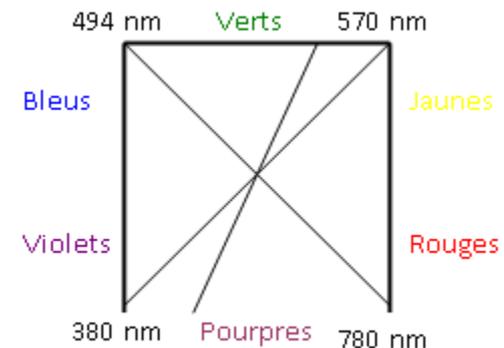
C.2) Mélange de lumières colorées

- **Métamères** : mélanges de lumières donnant la même sensation colorée

$$L = L_1 + L_2 = L_\lambda + L_w$$
$$L' = L_3 + L_4 = L_\lambda + L'_w$$

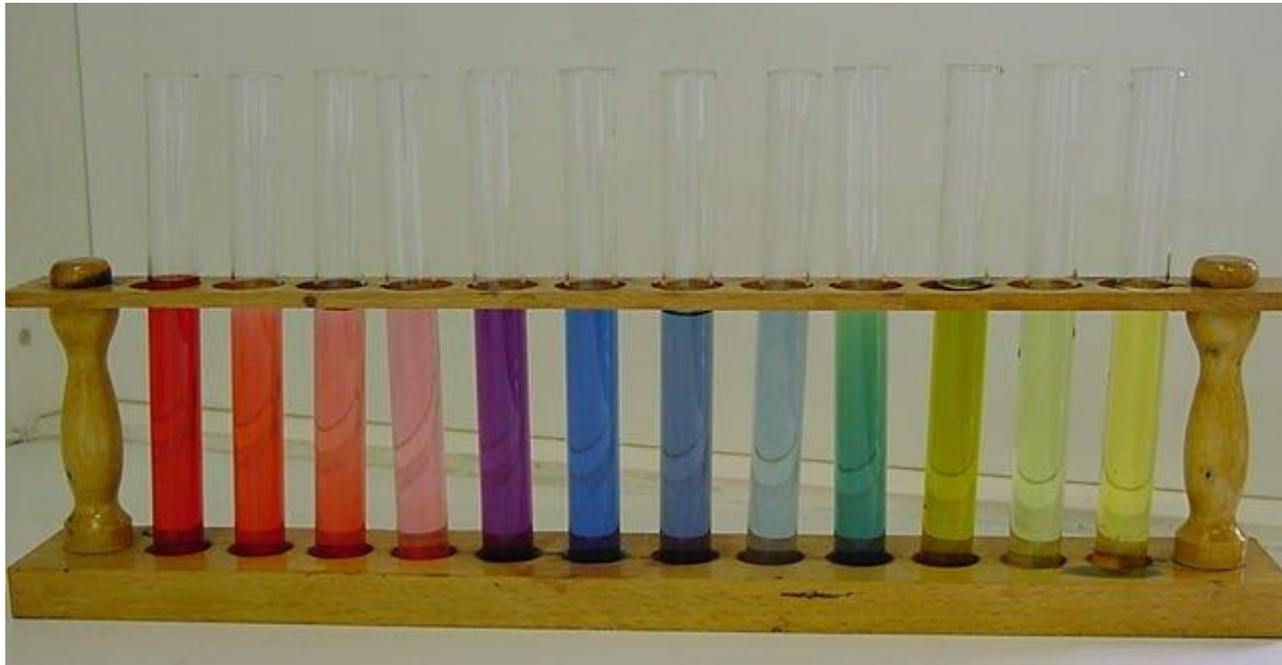
- **Couleurs complémentaires** : $L = L_1 + L_2 = L_w$

- Chaque couleur spectrale a sa couleur complémentaire dans le spectre sauf les radiations vertes



C.3) Colorimétrie

- **Colorimétrie** : science de la mesure des couleurs à l'aide de méthodes expérimentales



C.3) Colorimétrie

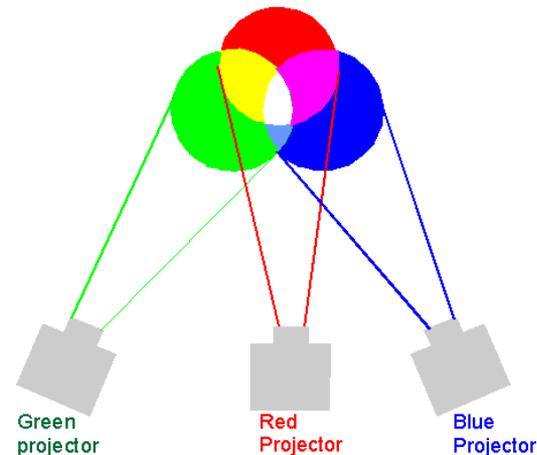
- Historiquement, on procédait par équivalences visuelles pour trouver des métamères : lois de Grassmann
 - *Deux excitations équivalentes à une troisième sont équivalentes entre elles.*
 - *Quand plusieurs excitations agissent simultanément sur l'œil, on ne change pas la sensation perçue si l'on remplace l'une d'entre elles par une autre équivalente.*
 - *Par suite, si des excitations E_1 et E_2 sont respectivement équivalentes à E'_1 et E'_2 , la somme $E_1 + E_2$ est équivalente à $E'_1 + E'_2$ (en particulier, si E et E' sont équivalentes, alors, $\forall n$, nE et nE' le sont aussi).*

C.3) Colorimétrie

- En lien avec les lois de Grassmann : utilisation de **3 couleurs primaires** (condition nécessaire et suffisante) représentées par le triplet (A,B,C) telles que :

$$L_A + L_B + L_C = L_W$$

- Synthèse additive :



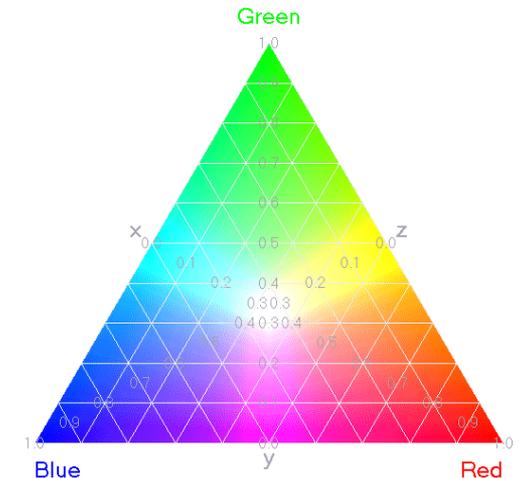
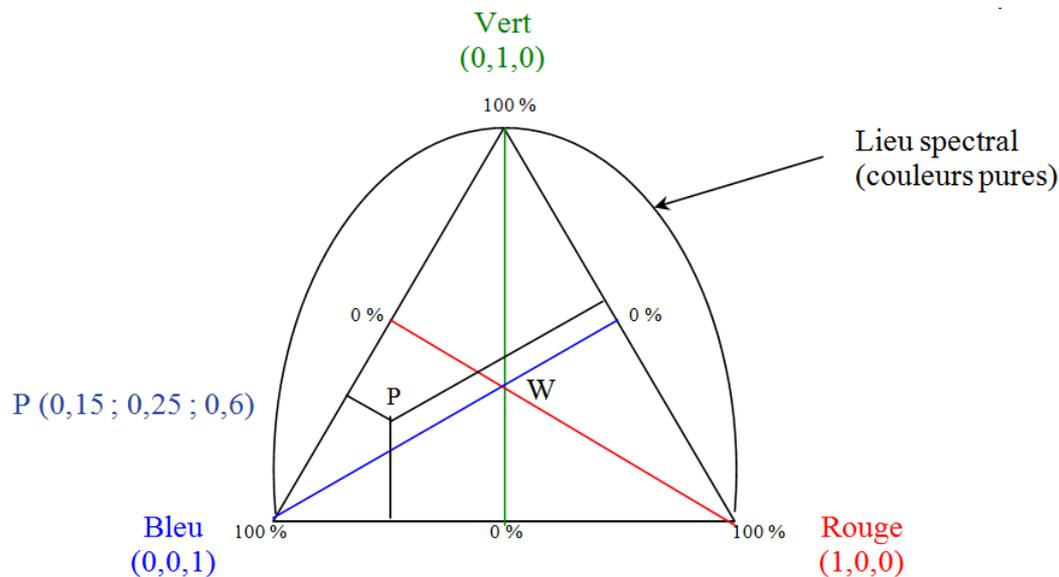
C.3) Colorimétrie

- **Triangle de Maxwell :**

$$L = R \cdot L_R + V \cdot L_V + B \cdot L_B = L_\lambda + L_W$$

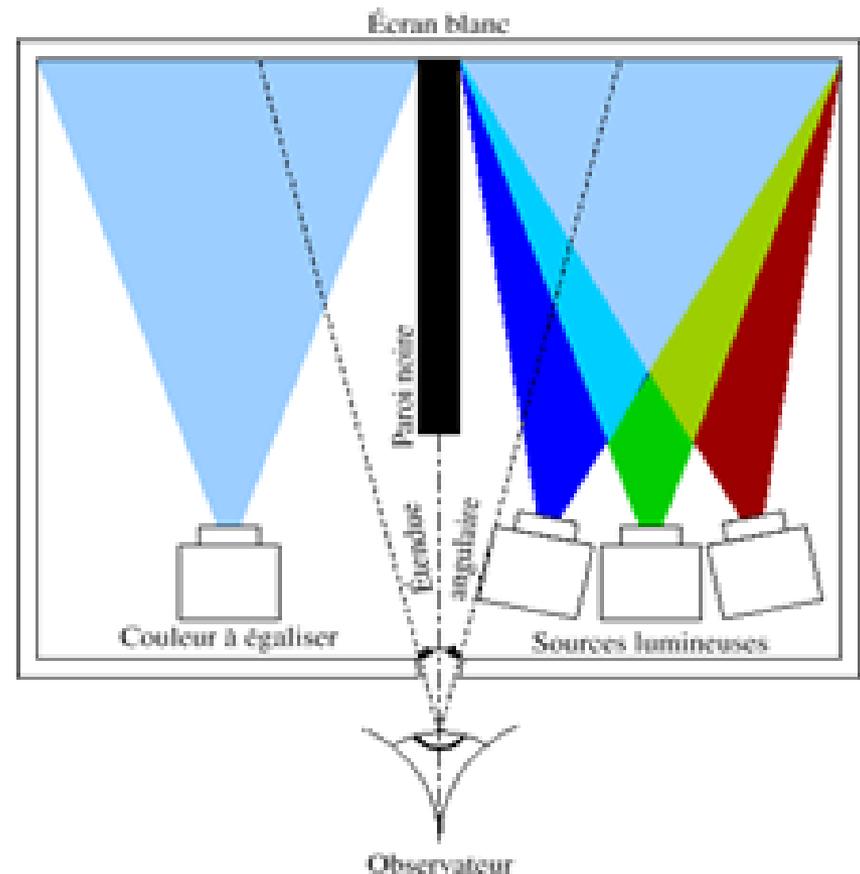
- Chaque point est repéré par ses coordonnées :

$$r = \frac{R}{R+V+B}; v = \frac{V}{R+V+B}; b = \frac{B}{R+V+B}$$



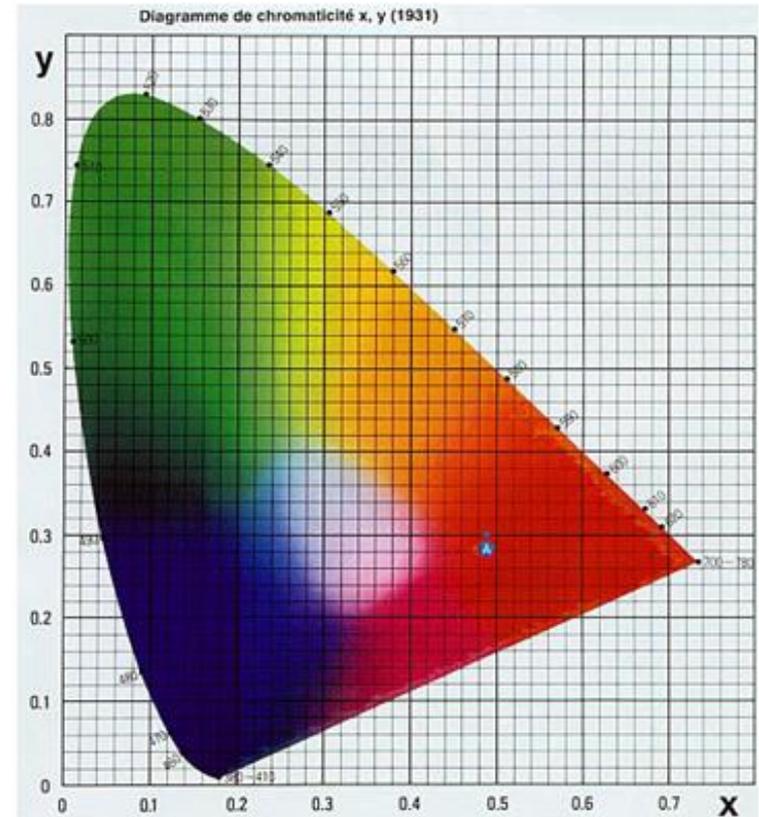
C.3) Colorimétrie

- En utilisant par exemple le triplet de couleurs primaires (R,V,B), la colorimétrie visuelle travaille par recherche de métamères :



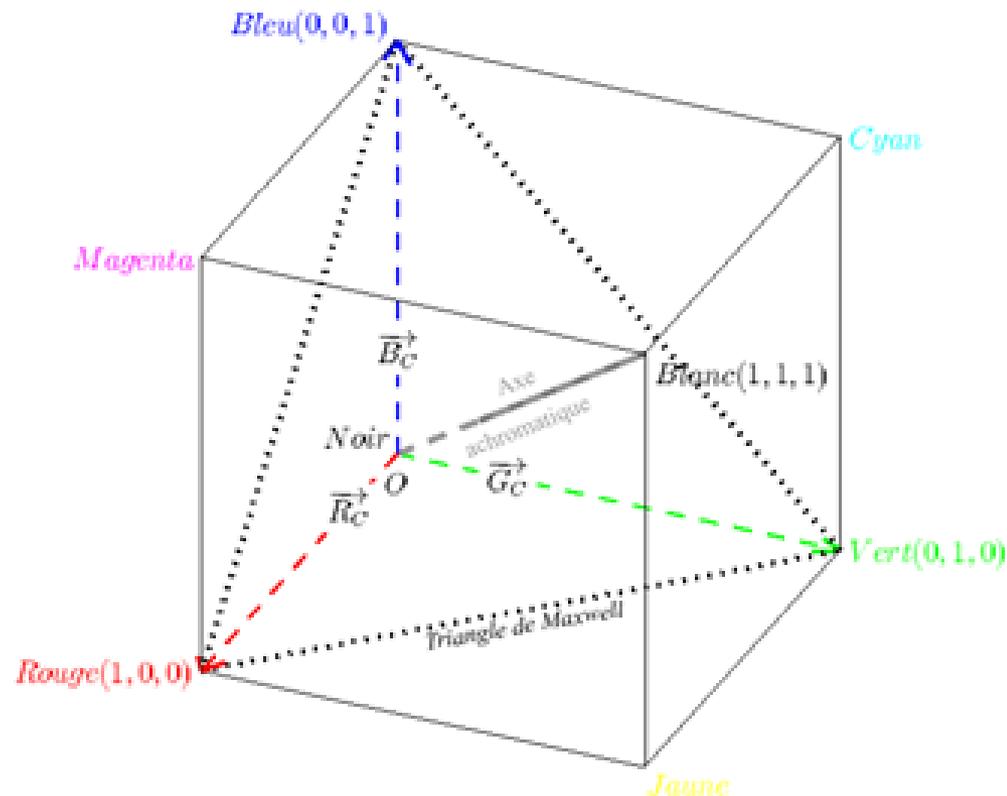
C.3) Colorimétrie

- **Systeme C.I.E. XYZ (1931)** : amélioration du système C.I.E. RVB en prenant en compte la physiologie de la vision



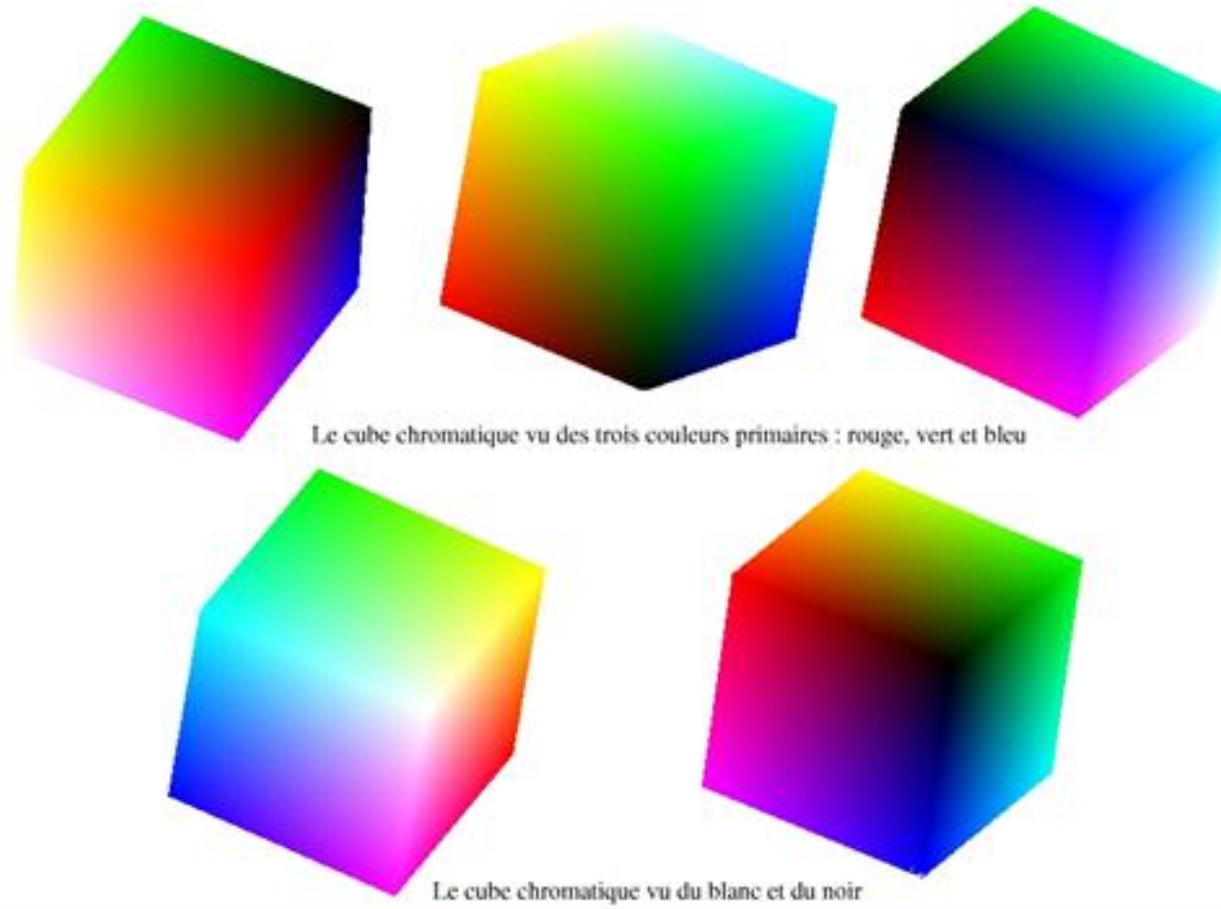
C.3) Colorimétrie

- Extension du triangle de Maxwell en 3D avec variation de luminosité : **cube des couleurs**



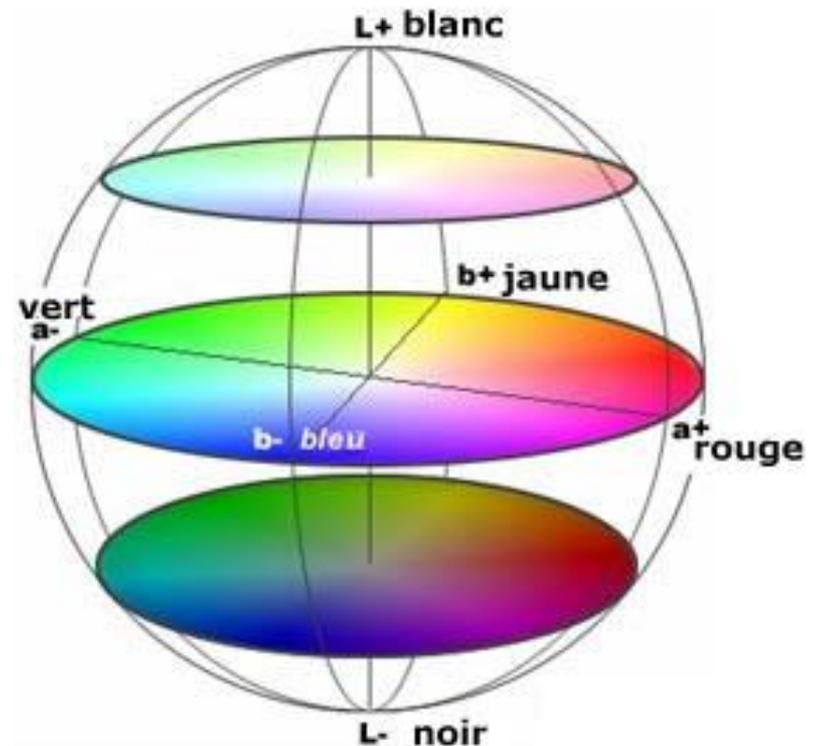
C.3) Colorimétrie

- **Cube des couleurs :**



C.3) Colorimétrie

- **Systeme C.I.E. Lab (1976)** : amélioration du système C.I.E. XYZ en prenant en compte les axes de comparaison de la vision des couleurs

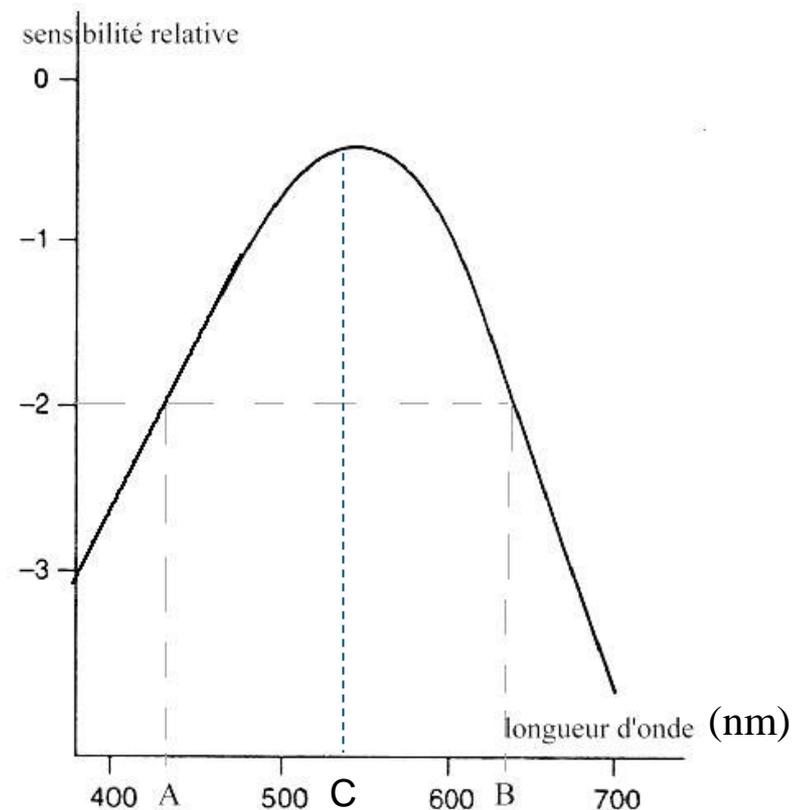


C.4) Trichromatisme

- Certains mammifères marins (baleines, dauphins, ...) n'ont que des cônes L : ils sont **monochromates**

A et B vues identiques mais moins lumineuses que C : vision en « niveau de gris »

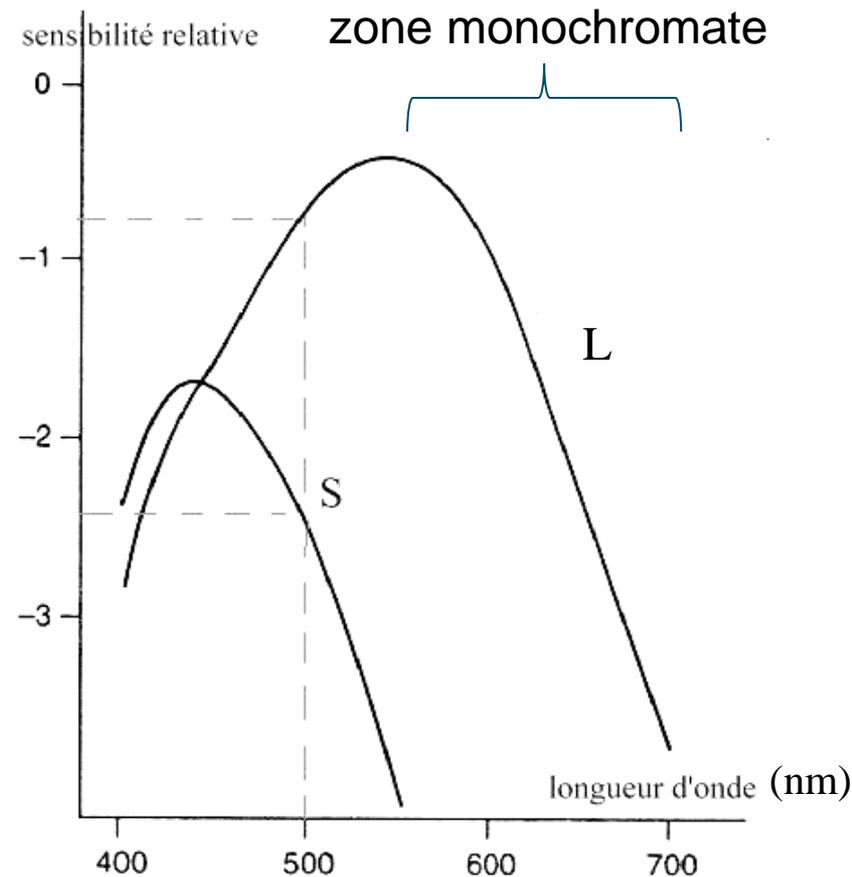
Rem : c'est aussi le cas de la vision nocturne des humains avec les seuls bâtonnets fonctionnels



C.4) Trichromatisme

- La plupart des mammifères ont des cônes S et L : ils sont **dichromates**

La radiation 500 nm va « activer »
 $x\%$ de cônes L et $y\%$ de cônes S
($x > y$ et $x + y = 100$)



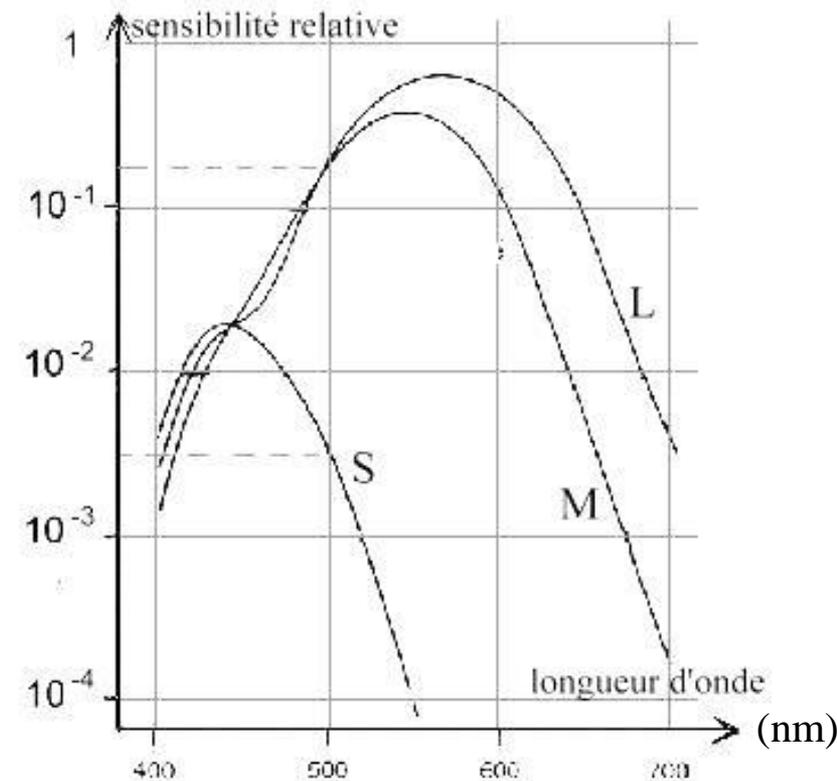
C.4) Trichromatisme

- Les humains et certains grands singes ont des cônes S, M et L : ils sont **trichromates**

$(x \approx z, x > y \text{ et } x + y + z = 100)$

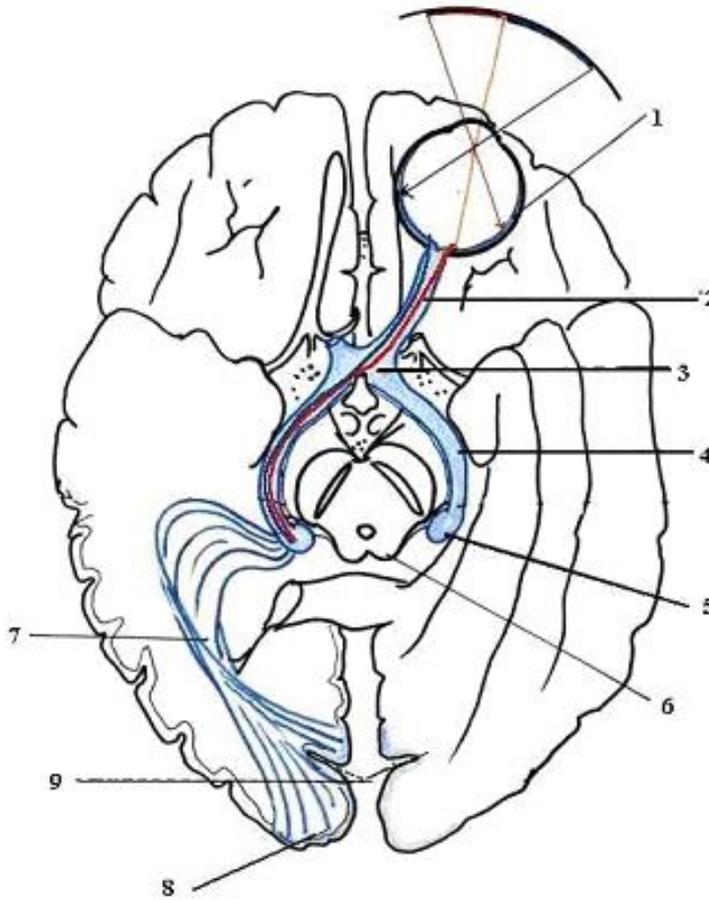
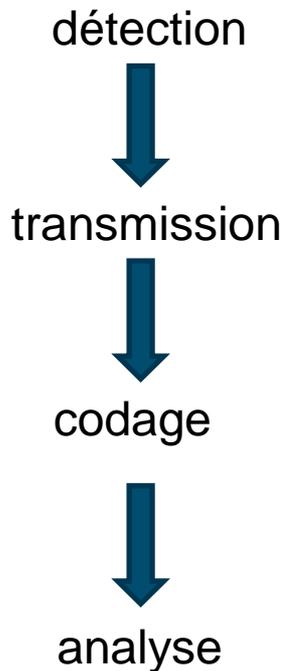
➔ Plus de zone monochrome

➔ Meilleure discrimination chromatique

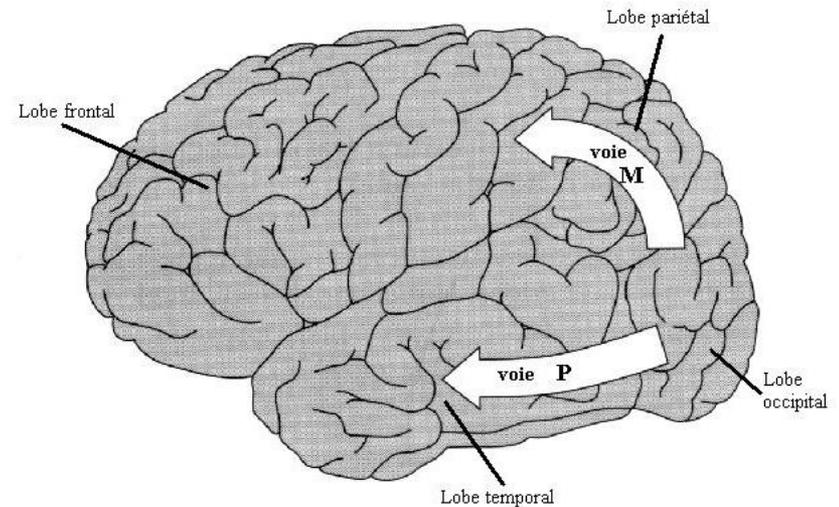


C.4) Trichromatisme

- Voie visuelle centrale P pour l'analyse des couleurs :



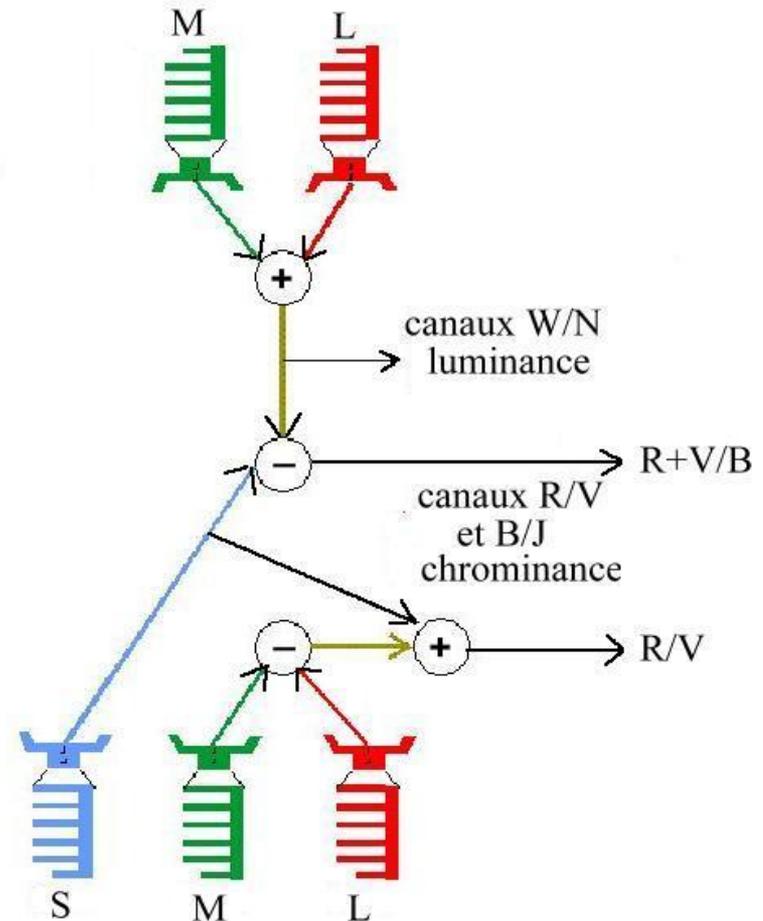
Vue de dessous



Vue de côté

C.4) Trichromatisme

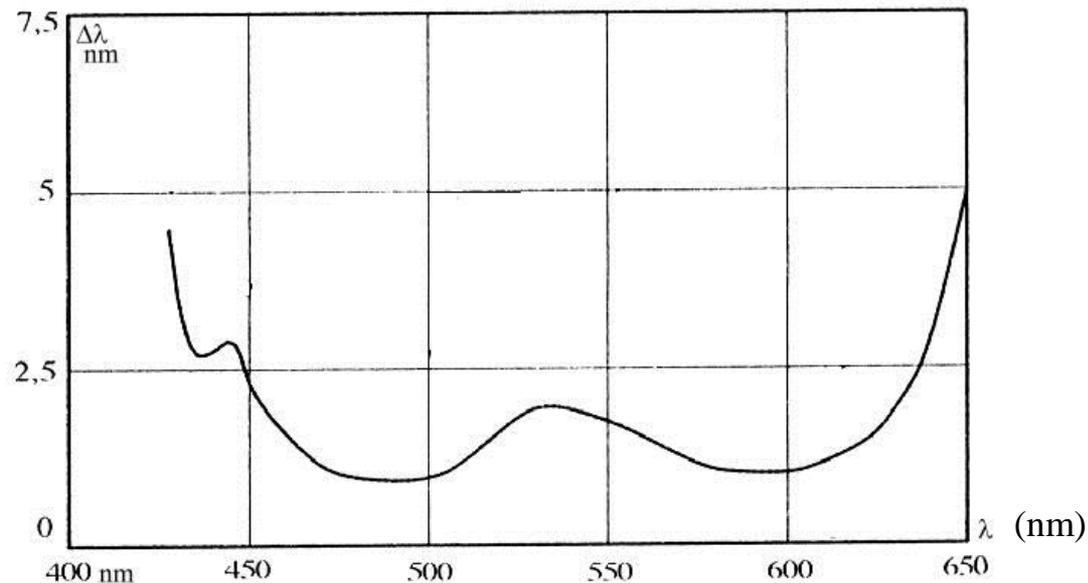
- Le **trichromatisme** est basé sur l'existence de **3 canaux d'analyse** de la perception colorée :
 - Canal antagoniste chromatique **Rouge/Vert (L/M)**
 - Canal antagoniste chromatique **Bleu/Jaune (S/L+M)**
 - Canal achromatique **Blanc/Noir (L+M)**



C.4) Trichromatisme

- Courbe du seuil chromatique différentiel :

$$\Delta\lambda_{\min} = f(\lambda)$$



Ce seuil est minimum dans le bleu-vert (autour de 480 nm) et dans l'orange (autour de 590 nm), par contre il est élevé dans les violets et les rouges.

C.5) Défauts vision des couleurs

Pigment Cône	%	erythrolabe L	chlorolabe M	cyanolabe S
Trichromates normaux	92 %	Normal	Normal	Normal
Trichromates anormaux	6 %	Protanomalie Anomalie Hart (1 %)	Deutéranomalie Anomalie Rayleigh (5 %)	Tritanomalie (très rare)
Dichromates	2 %	Protanopie Anomalie Dalton (1 %)	Deutéranopie Anomalie Nagel (1 %)	Tritanopie Rare (1/10 ⁵)
Monochromates Achromates	0,0003 %			– cônes S et bâtonnets – bâtonnets seulement



Anomalies héréditaires

C.5) Défauts vision des couleurs

Illustration de la vision
des dichromates et
achromates

Perruche
arc-en-ciel australienne



achromate



tritanope



deutéranope
nagélien



protanope
daltonien

D. Sensibilité aux contrastes

D.1) Acuité visuelle

D.2) Contraste

D.3) Sensibilité spatiale

D.4) Sensibilité temporelle

D.1) Acuité visuelle

- **Acuité visuelle** \leftrightarrow performance système visuel pour perception des détails
- Hooke (1635-1703) : introduction de la notion d'acuité visuelle
 - Pouvoir de distinguer avec un seul œil deux étoiles rapprochées
 - Mesure d'un écart angulaire d'une minute d'arc ($1' = 1/60^\circ$)



D.1) Acuité visuelle

- Acuité de détection d'objets brillants sur fond noir : visibles si leur intensité I (en cd) est suffisante par rapport à la luminance L du fond

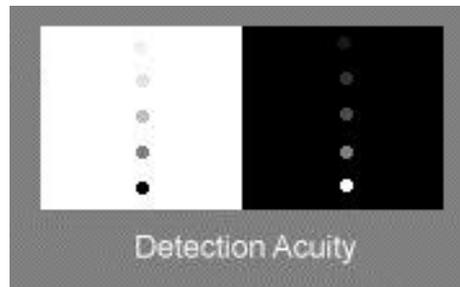
Ciel nocturne préservé en Arizona



Ciel nocturne non préservé à NYC

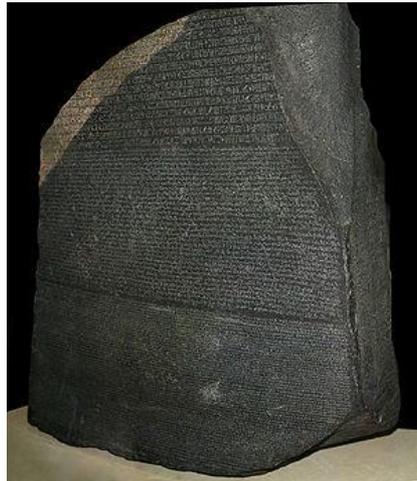
D.1) Acuité visuelle

- Acuité de détection d'objets sombres sur fond clair :
 - Présentation de formes géométriques noires de taille de plus en plus petite sur fond blanc
 - Visible si diamètre angulaire de l'ordre de 0,5 à 1'
- Détection d'objets plus ou moins contrastés par rapport au fond :
 - Présentation de formes géométriques de niveaux de gris sur fond blanc ou noir



D.1) Acuité visuelle

- Acuité de résolution exprime le fait que des détails proches de l'espace visuel soit séparés



Pierre de Rosette
déchiffrée par
Champollion

- Utilisation de cette performance dans vie quotidienne (lecture, conduite, ...) : enjeu de santé publique

D.1) Acuité visuelle

- D'une manière générale :

$$AV = \frac{1'}{\alpha_{\min}}$$

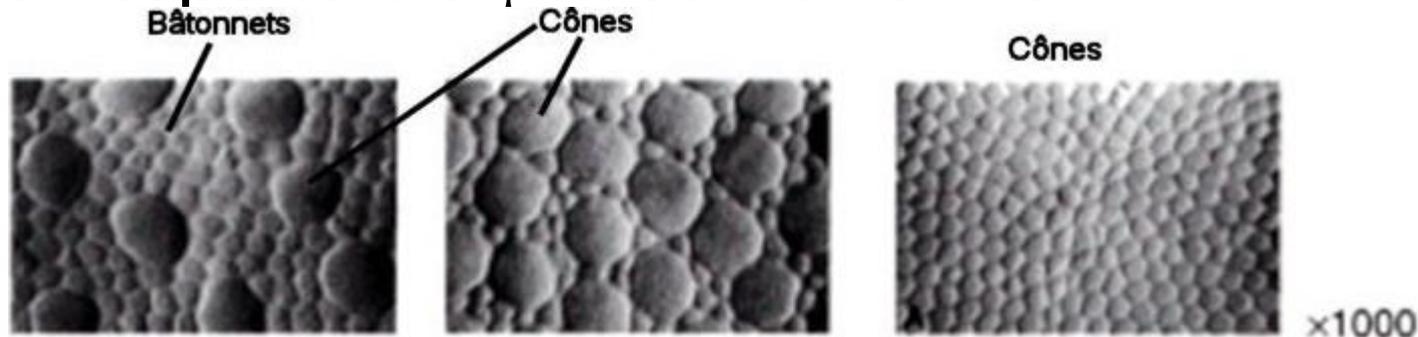
AV : Acuité Visuelle

α_{\min} : écart angulaire minimal en ' entre 2 détails séparables

- Valeur référence :

$$AV = 1 = 10/10 \quad \text{quand} \quad \alpha_{\min} = 1'$$

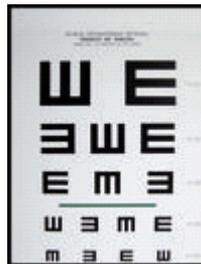
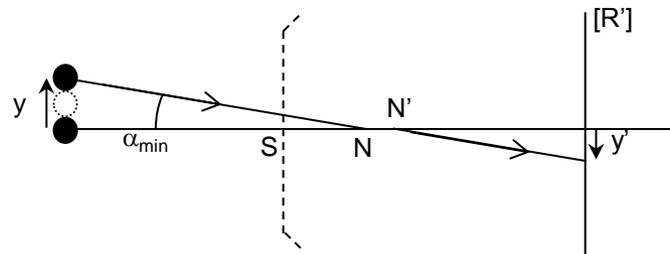
- 1' correspond à 5 μm sur la rétine :



D.1) Acuité visuelle

- Mesures effectuées en optométrie avec échelles d'acuité (optotypes noirs sur fond blanc lumineux)

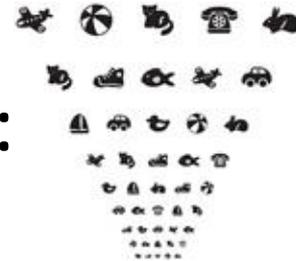
$$AV = \frac{1'}{\alpha_{\min}}$$



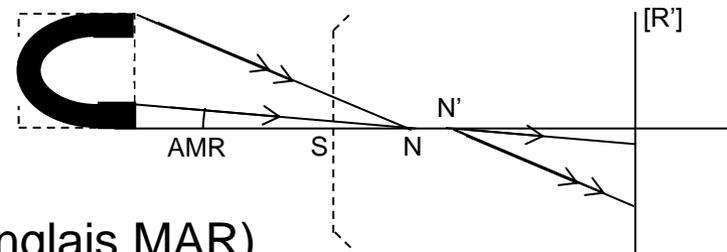
Ex : Tridents de Snellen Anneaux de Landolt

D.1) Acuité visuelle

- Intervention des mécanismes de reconnaissance de forme d'optotypes : lettres, chiffres, dessins
- Aspect cognitif de la reconnaissance facilite la résolution optique



$$AV = \frac{1'}{AMR}$$



AMR : Angle Minimal de Résolution (en anglais MAR)

D.2) Contraste

- Facteur extrinsèque important dans performance du système visuel
- **Contraste de luminance C :**

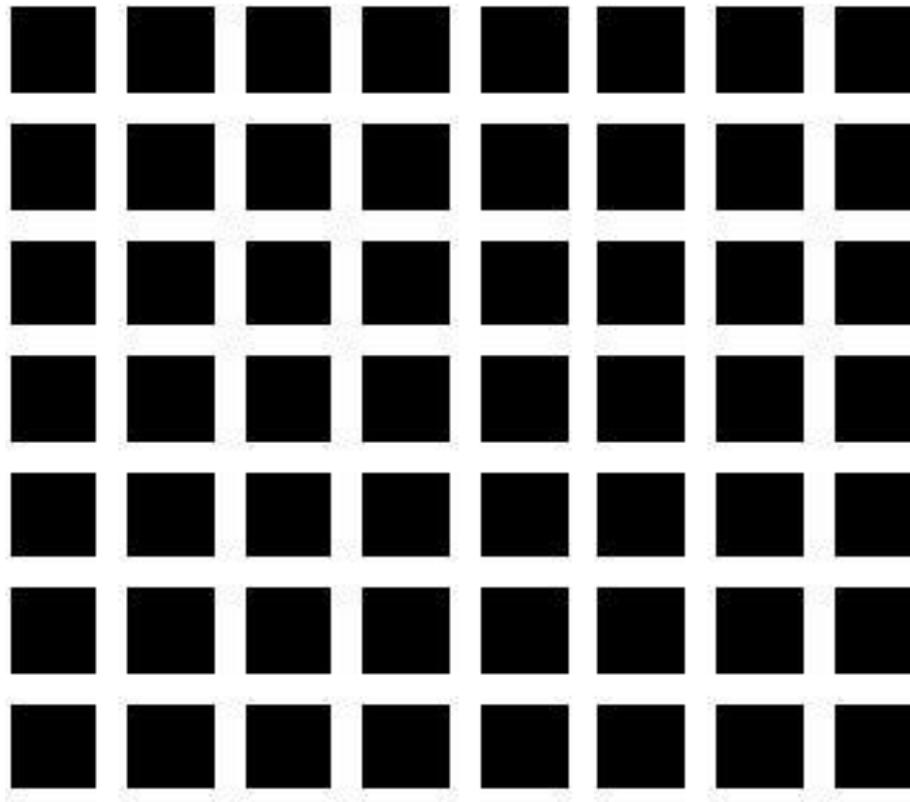
$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \Rightarrow C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2L_{\text{moy}}}$$

$$L_{\text{moy}} = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2}$$

- Existence d'un contraste de couleurs

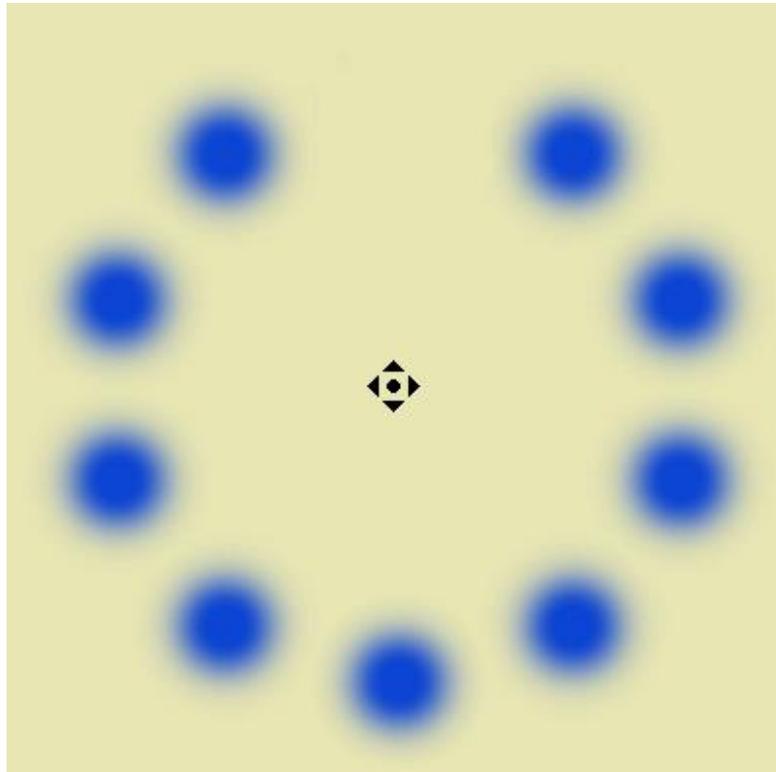
D.2) Contraste

- Contraste peut être :
 - Spatial : à un instant t donné : $L(M)$



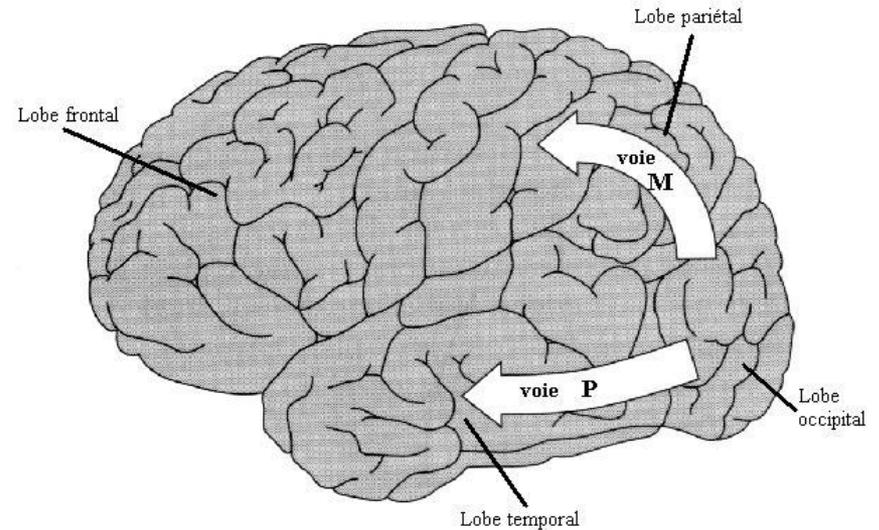
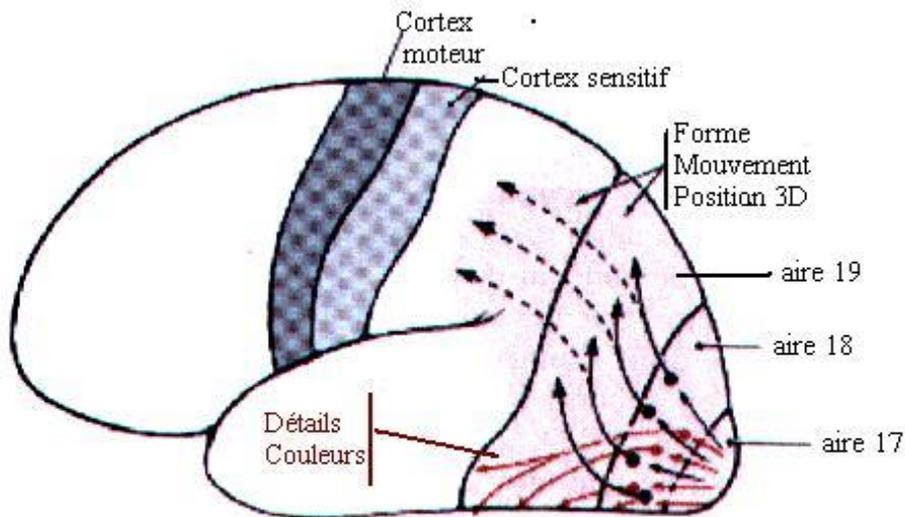
D.2) Contraste

- Contraste peut être :
 - Temporel : en un point M donné : $L(t)$



D.2) Contraste

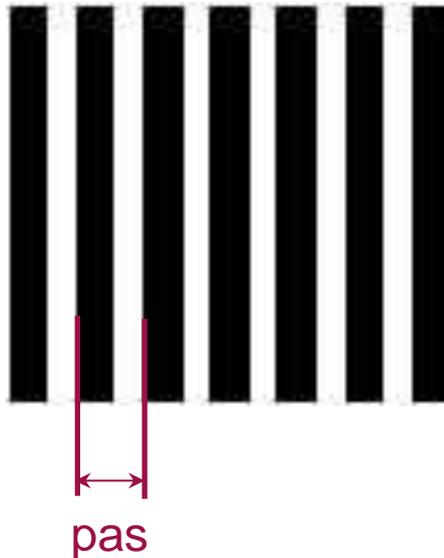
- Analyse des contrastes dans le cortex visuel :



D.3) Sensibilité spatiale

- 1^{ère} utilisation des réseaux spatiaux par Foucault (1859) pour mesurer la limite de résolution d'instruments

Mire de
Foucault

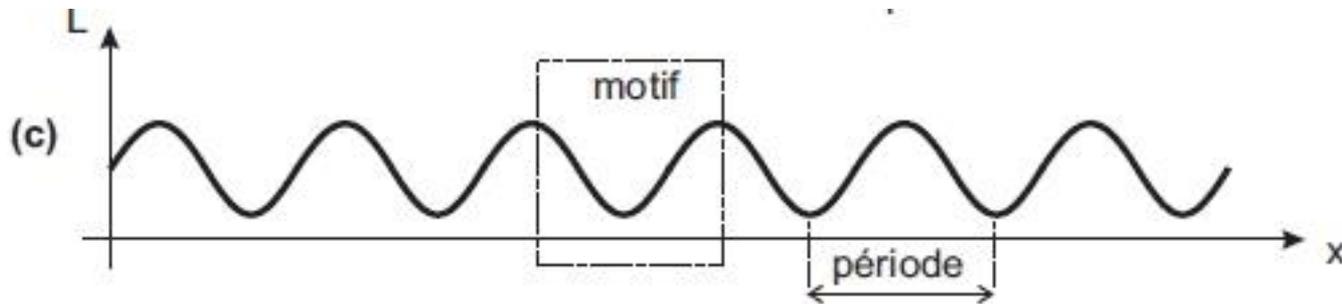


pas \leftrightarrow période spatiale

$u = 1/\text{pas} \leftrightarrow$ fréquence spatiale

D.3) Sensibilité spatiale

- Réseau spatial sinusoïdal : sert de référence pour tous les autres réseaux

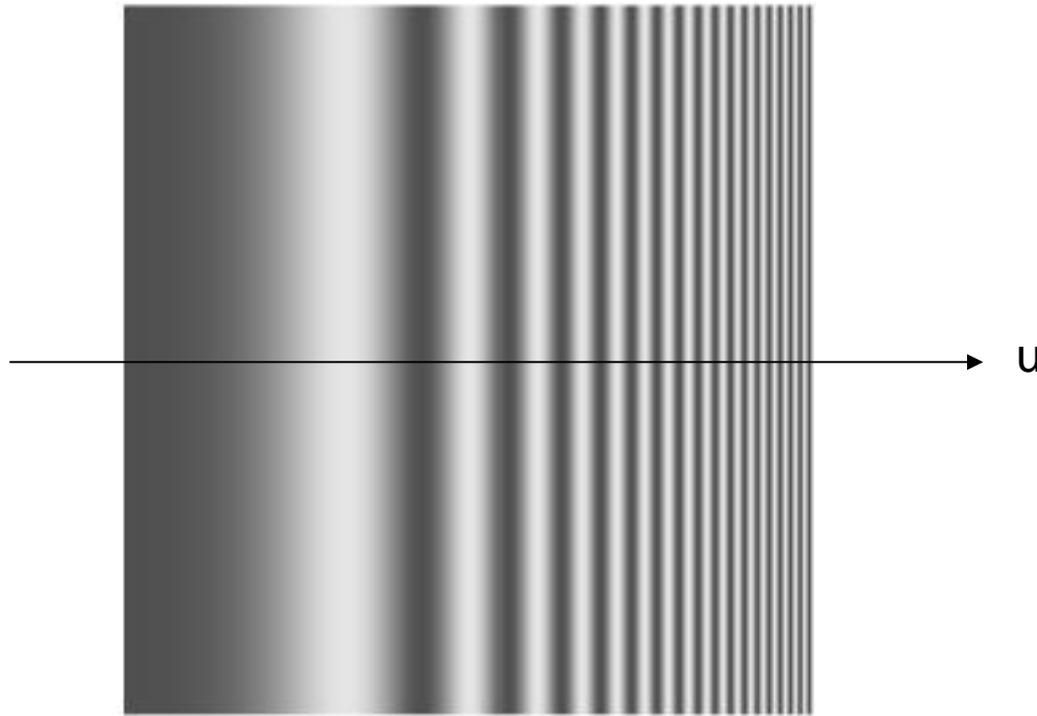


$$L(x) = 1 + \sin(2\pi ux)$$

- u : fréquence spatiale (m^{-1})
- L : luminance normalisée
- $L_{\min} = 0$; $L_{\max} = 2$ donc $C = 1$

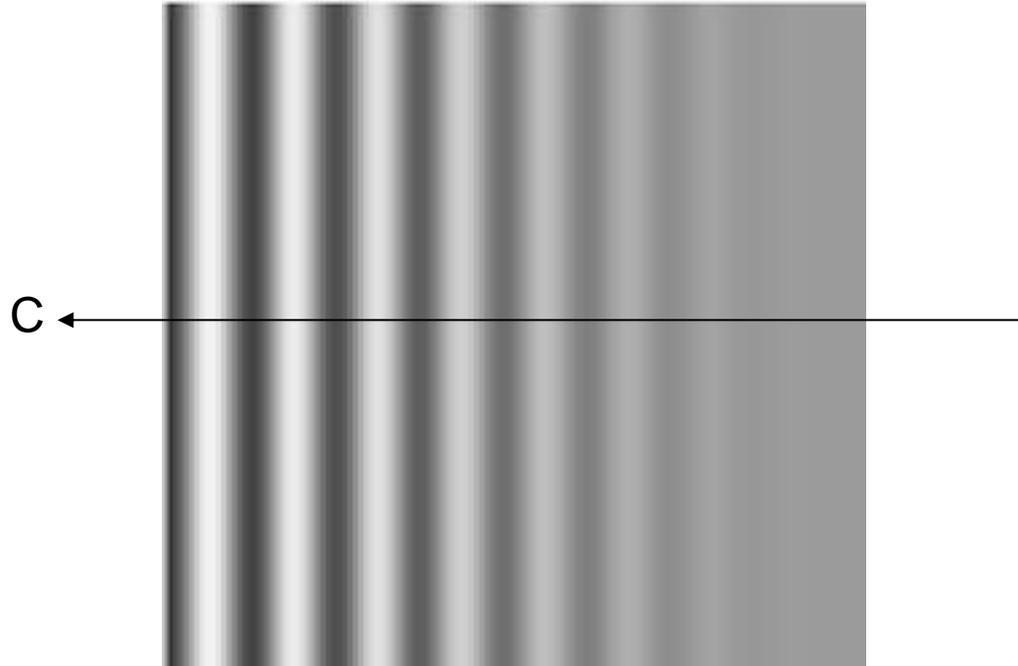
D.3) Sensibilité spatiale

- Variation de fréquence spatiale u à contraste $C = \text{cste}$:



D.3) Sensibilité spatiale

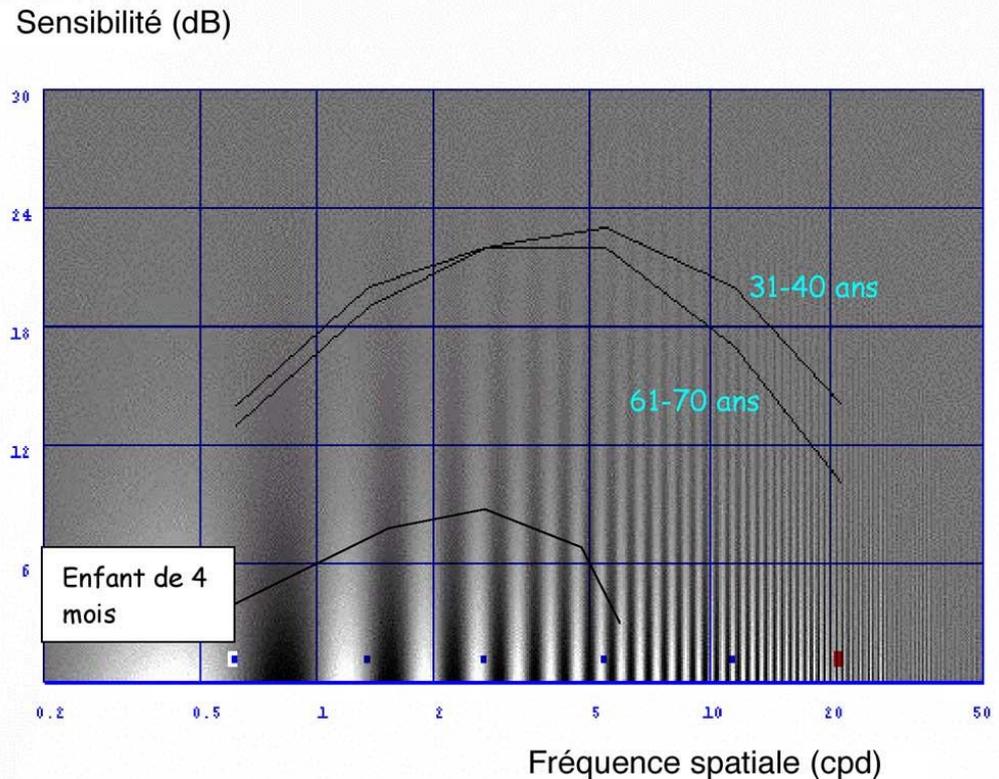
- Variation de contraste C à fréquence spatiale $u = \text{cste}$:



D.3) Sensibilité spatiale

- Évolution de la sensibilité aux contrastes spatiaux en fonction de l'âge :

Œil : filtre spatial passe-bande mais se rapprochant plus d'un filtre passe-bas

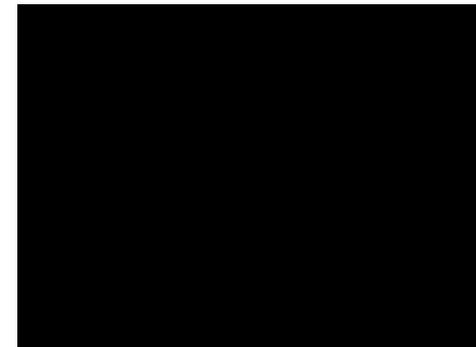


D.3) Sensibilité spatiale

- **Hautes fréquences spatiales :**
faible sensibilité au contraste due à la présence de taches de diffraction et d'aberrations qui limitent la résolution
- **Faibles fréquences spatiales :**
faible sensibilité au contraste due à une limitation non pas optique mais physiologique (modèle du champ récepteur des neurones)

D.4) Sensibilité temporelle

- 2 caractéristiques à considérer :
 - capacité du système visuel à détecter des stimuli courts dans le temps (cas d'un flash rectangulaire)
 - réponse du système visuel à un stimulus variable dans le temps en fonction de leur fréquence temporelle f



D.4) Sensibilité temporelle

- Réponse à un flash lumineux s'effectue avec un temps de latence lié à la notion de persistance rétinienne
- Correspondance avec la durée des cycles de Wald des photorécepteurs :
 - 50 ms pour les cônes
 - 300 ms pour les bâtonnets
- Implication dans la réponse aux lumières périodiques

D.4) Sensibilité temporelle

- Utilisation d'une lumière sinusoïdale dans le temps avec variation de contraste :

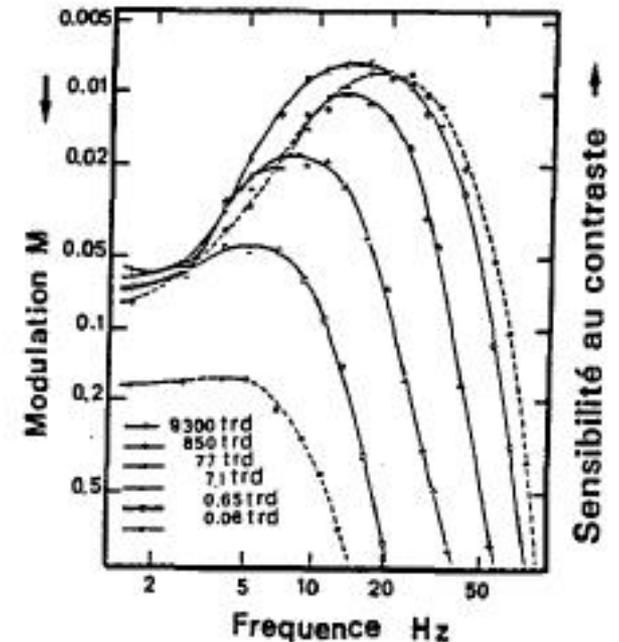
$$L(t) = L_{\text{moy}}(1 + M \cos(2\pi ft))$$

f : fréquence temporelle en Hz

- $L_{\text{max}} = L_{\text{moy}}(1+M)$ $L_{\text{min}} = L_{\text{moy}}(1-M)$
- Variation de C en fonction du paramètre de modulation temporelle M

D.4) Sensibilité temporelle

- Aux faibles éclairagements rétinien :
→ **FILTRE TEMPOREL PASSE BAS**
- Aux moyens et forts éclairagements rétinien :
→ **FILTRE TEMPOREL PASSE BANDE**
- Maximum se décale vers les HF lorsque l'éclairage rétinien ↗



Courbes de sensibilité au contraste temporel (courbe de De Lange) (d'après Kelly, 1961).

D.4) Sensibilité temporelle

- Fréquence maximale de détection de papillotement (effet visuel) : **FCF (Fréquence Critique de Fusion)**
- La FCF est entre 20 et 90 Hz selon l'éclairement rétinien
- Pour $f > \text{FCF}$: perte du papillotement, perception stationnaire de luminance L_{moy}

D.4) Sensibilité temporelle

- Augmentation de la luminance des écrans → papillotement dû au rafraichissement des images
- Passage de 50 Hz à 100 Hz
- Courbe de sensibilité au contraste temporel permet de prévoir le papillotement d'un écran quelconque



Bibliographie et références

- Cours Christiane Caudrelier Lycée Fresnel Paris
- www.fresnel.fr/perso/pferrand
- <http://p.jean2.pagesperso-orange.fr>
- Cours Optométrie Faculté des Sciences Orsay
- P. Buser, Vision, Herman
- R. W. Rodieck et al., La vision, De Boeck
- A. Delorme et M. Flükiger, Perception et réalité, De Boeck
- Y. Le Grand, Optique physiologique, Masson
- Recueil de conférences des congrès d'optométrie de l'AOF
- www.ophtalmo.net/bv/index.html

Merci pour votre attention

Des questions ?