

**PCEM2**

**Certificat de Neurosciences**

**BIOPHYSIQUE DE LA VISION**

professeur M. ZANCA

*Avril 2010-11*

**GENERALITES**

**SUR LA**

**BIOPHYSIQUE**

**SENSORIELLE**

Les **sens** permettent la perception des signaux émis dans le monde extérieur.

**Le signal** est une forme spécialisée d'énergie qui transporte un message physique précis.

### Quatre étapes physiologiques :

- **Perception** par chaîne de détection, de structure équivalente pour vision, audition, odorat, goût, équilibre vestibulaire, sensibilité,
- **Transduction** du signal physique en un signal biochimique (PA = potentiel d'action),
- **Pré traitement** du PA dans voies de transmission vers les centres nerveux
- **Analyse et interprétation** sont centrales (centres cérébraux).

<b>Chaîne sensorielle</b>	<b>Vision</b>	<b>Audition</b>
<b>Signal</b>	REM visible (380 à 780 nm)	vibration sonore
<b>Capture du signal</b>	globe oculaire	oreille externe et moyenne
<b>Transduction</b>	rétine	cochlée
<b>Transmission</b>	voies optiques	voies auditives
<b>Analyse et interprétation</b>	aires 17, 18 & 19 cortex occipital	aires 41 & 42 cortex temporal

# Ex. pour la vision

## Voies optiques

**Organes  
récepteurs**

cônes et bâtonnets

**1<sup>er</sup> neurone**

cellules bipolaires

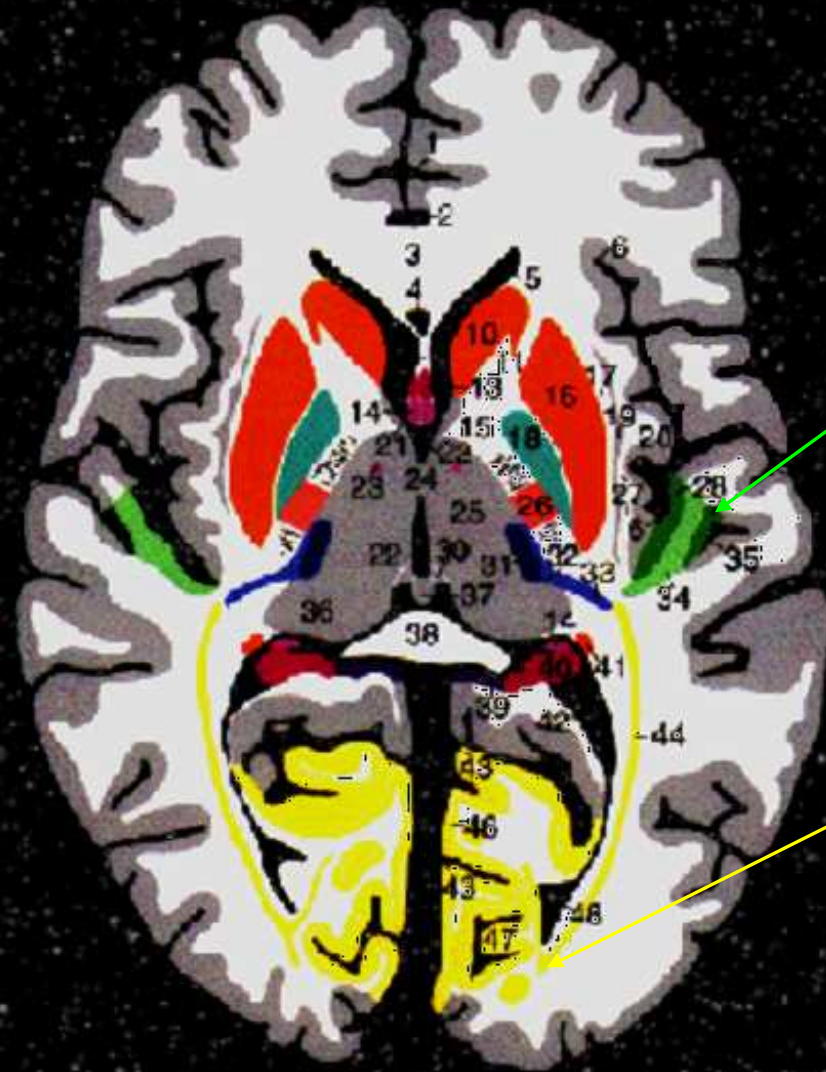
**2<sup>ème</sup> neurone**

cellules ganglionnaires →  
corps géniculé ext controlat

**3<sup>ème</sup> neurone**

corps géniculé → cortex  
occipital

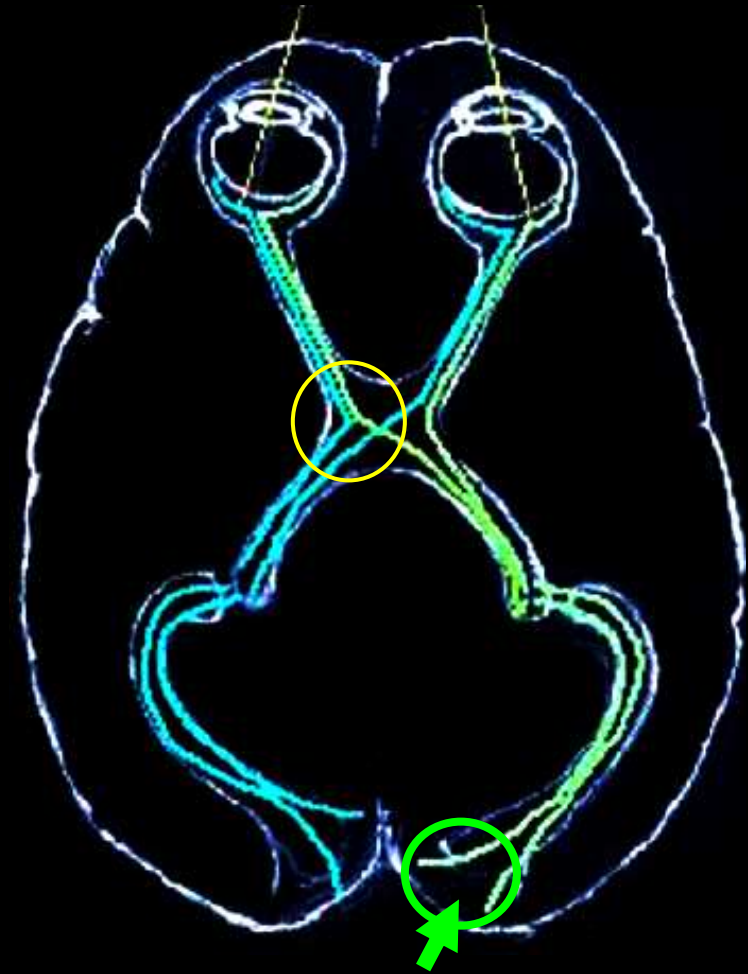
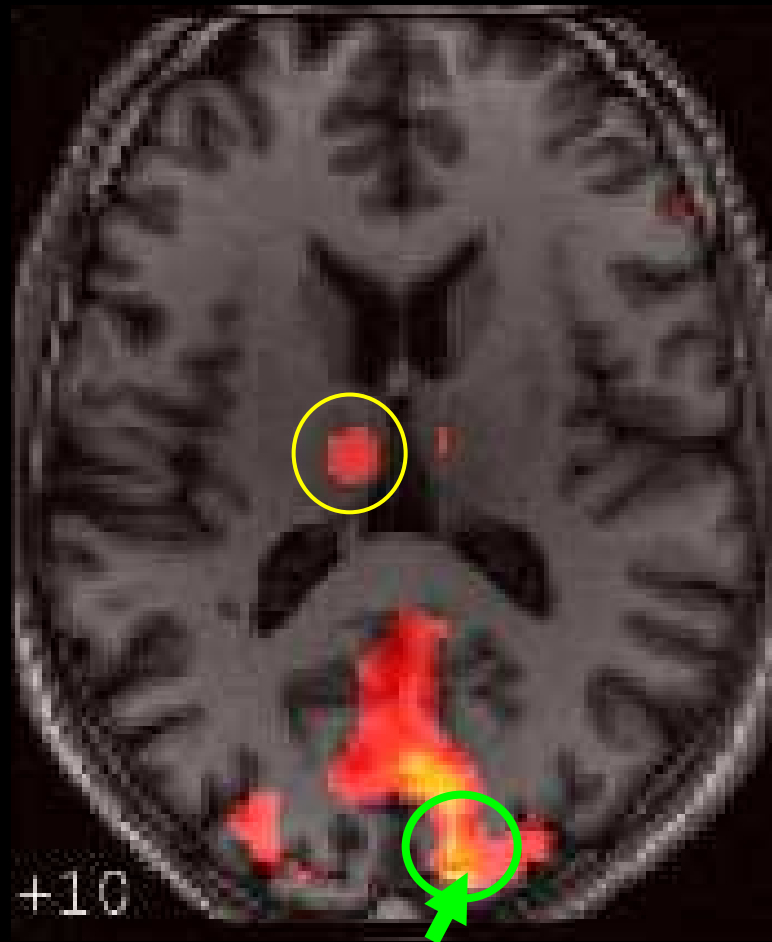
# Aires primaires



Cortex  
auditif  
primaire

Cortex  
visuel  
primaire

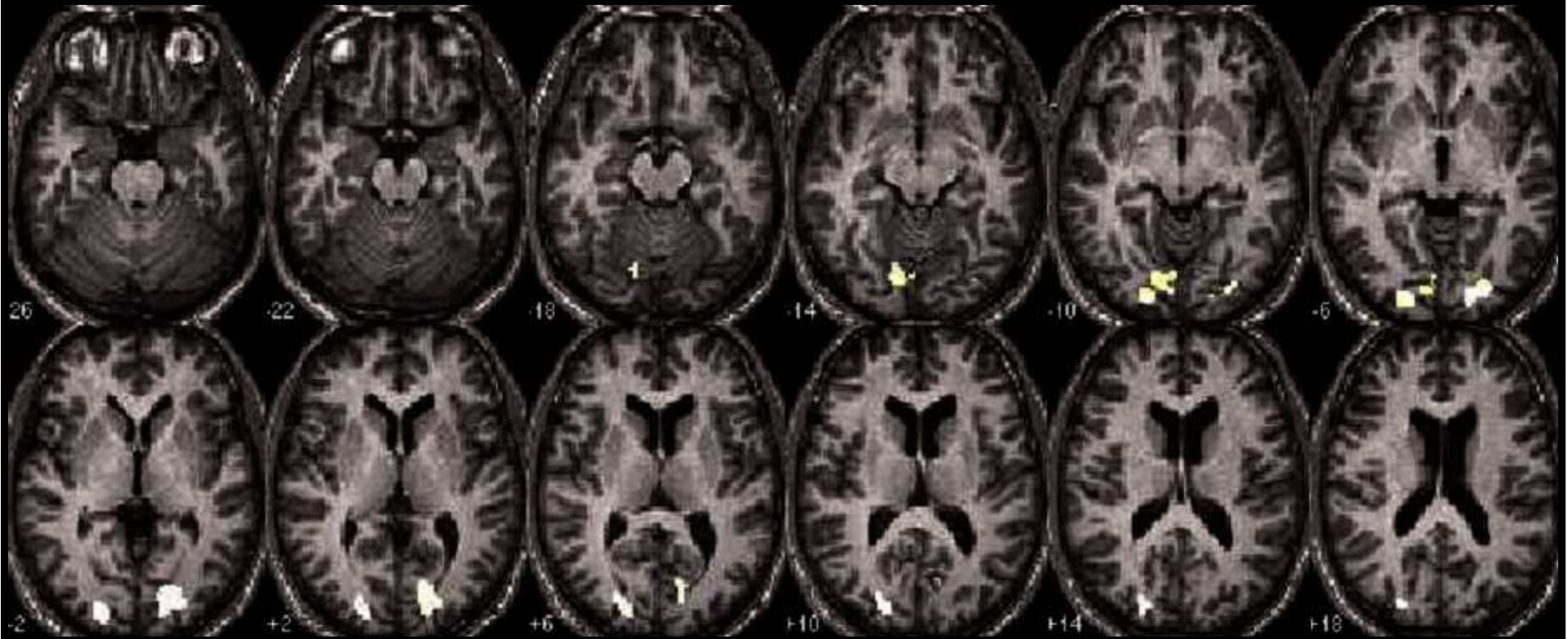
# IRMf du cortex VISUEL



# IRMf cortex visuel

ouvre/ferme paupières

Analyse de groupe, 43 sujets, coupes épaisses ( $\Delta x$ )

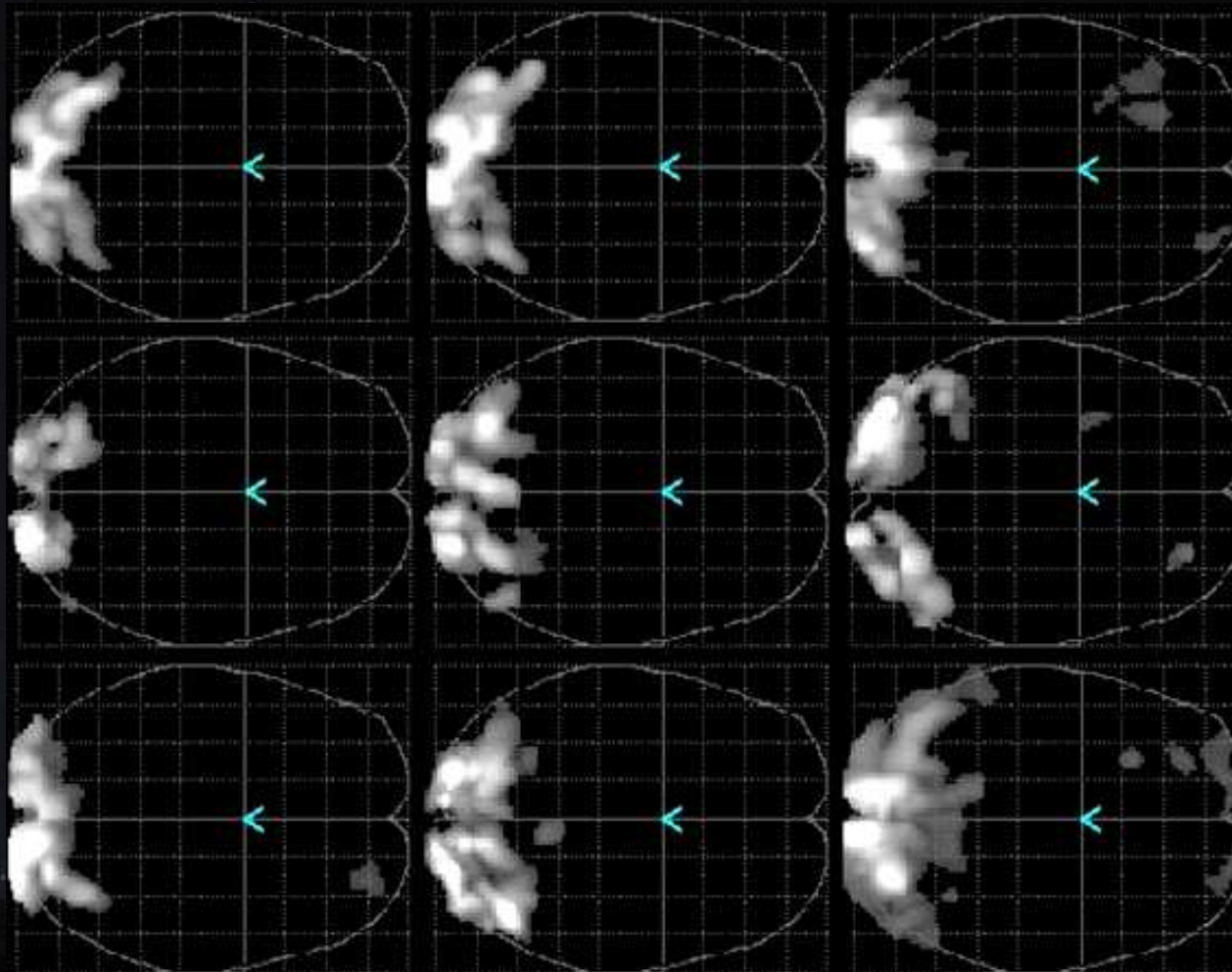




Très peu de variations entre individus

Ouvrir / fermer les paupières

Stimuli visuels chez 9 sujets différents



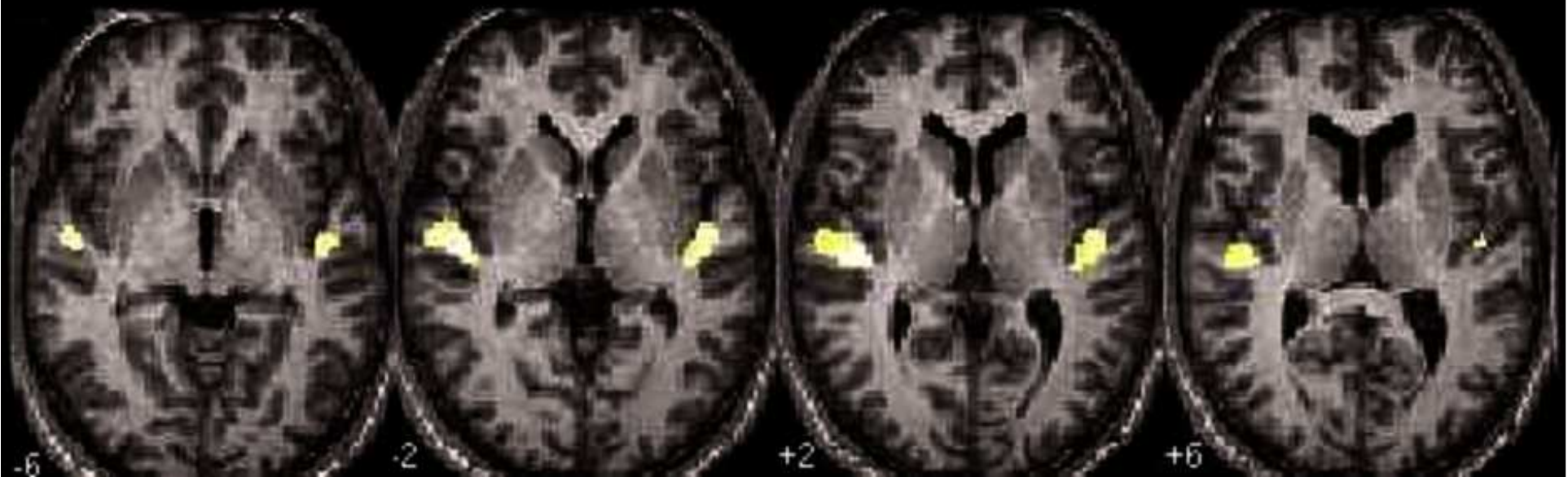
Très grande reproductibilité

*Gil MORROT & M. ZANCA, CNRS-CHU Montpellier*

# IRMf du Cortex Auditif

Audition musique d'ambiance

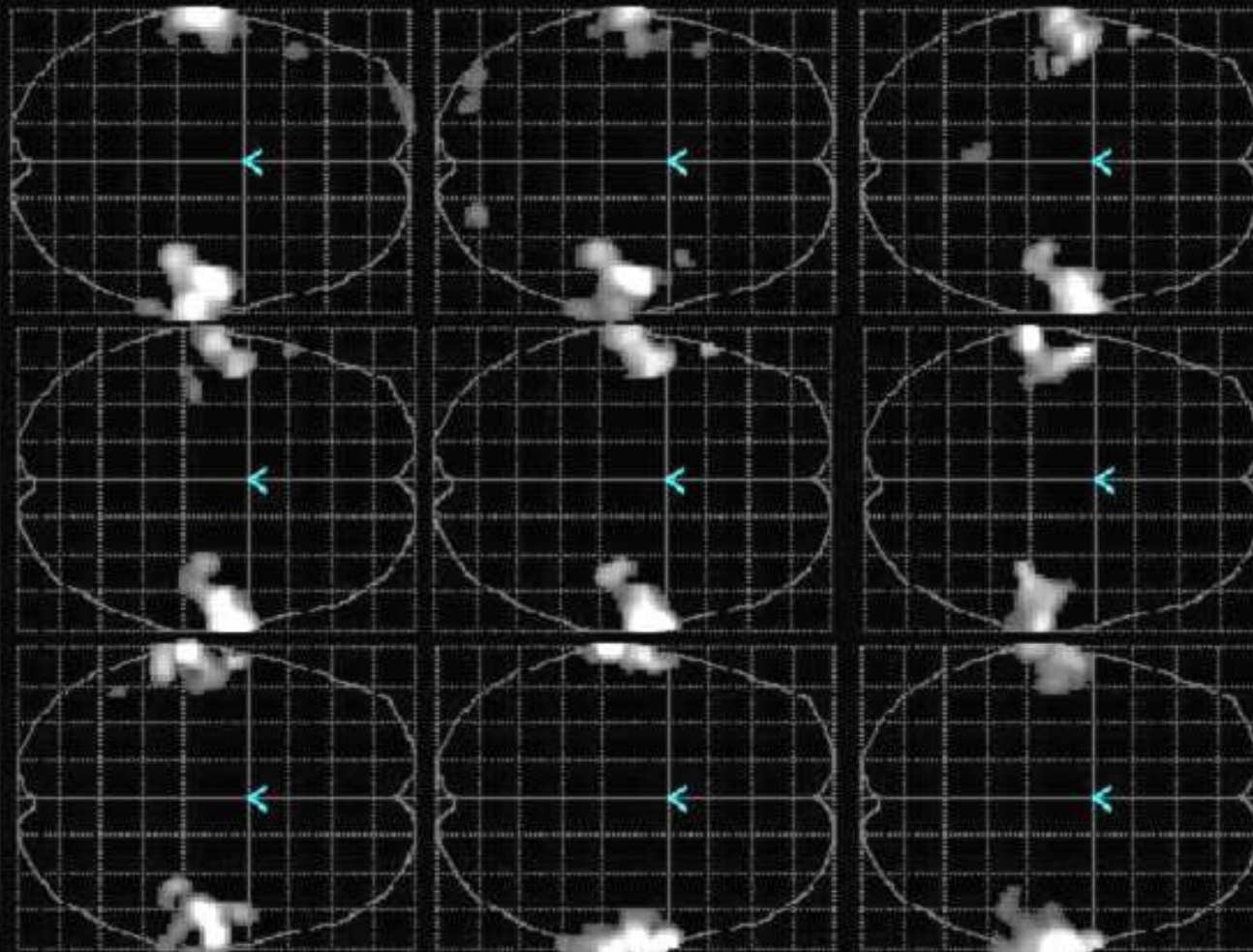
Analyse de groupe, 42 sujets



Très peu aussi de variations entre individus

Alternance silences / musique d'ambiance

Stimuli auditifs chez 9 sujets différents



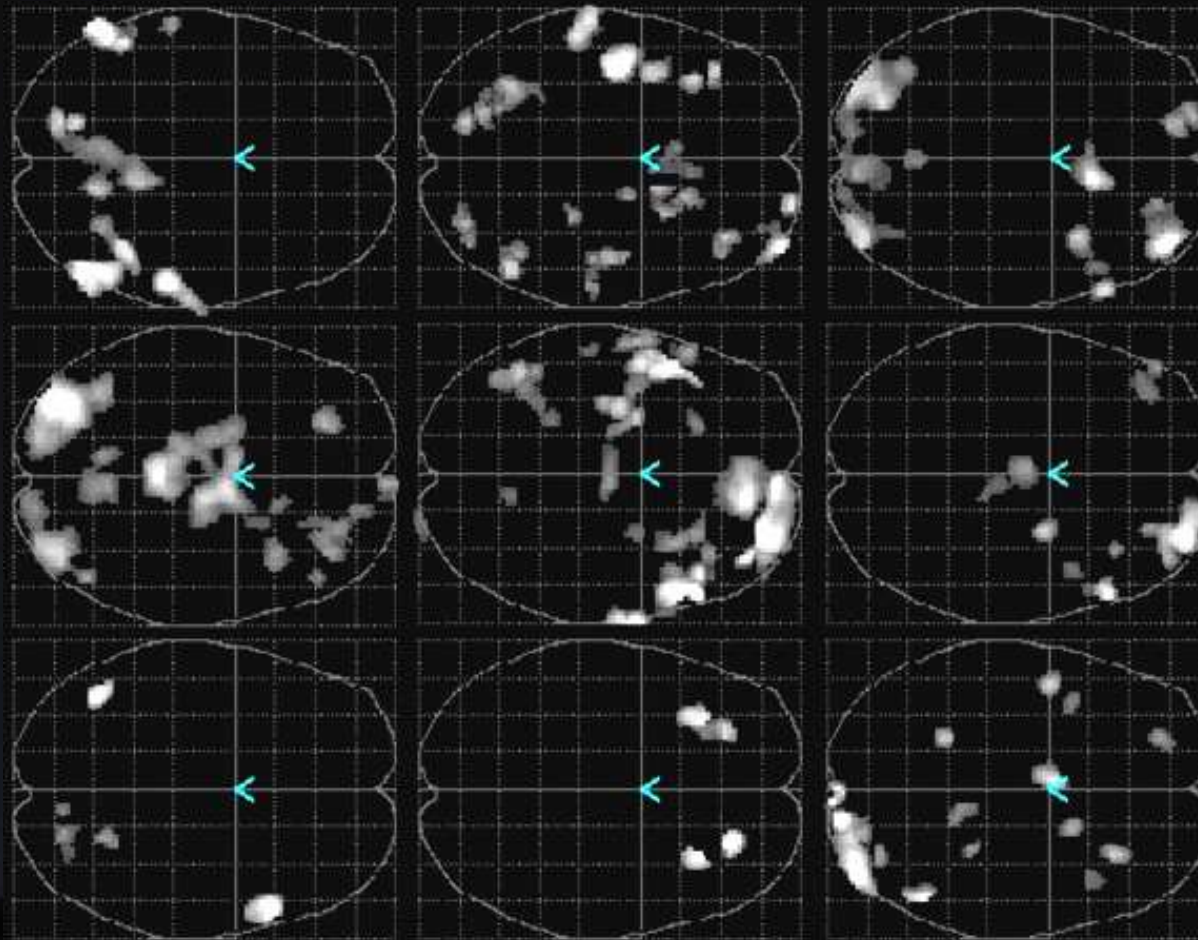
Très grande reproductibilité

*Gil MORROT & M. ZANCA, CNRS-CHU Montpellier*

# Enormes variations inter individuelles...

Stimuli olfactifs chez 9 sujets différents

Non reproductibilité de la détection olfactive



Très grande dispersion

1<sup>ère</sup> partie

La physique

**La LUMIERE**

**ou**

**partie "VISIBLE" des REM**

# LE MESSAGE PHYSIQUE : lumière (REM visible)

« Spectre visible » perçu sous forme de couleurs, impressions subjectives séparant le spectre en familles de longueurs d'ondes

$\lambda$ en nm	sensation de couleur	$\lambda$ en nm	sensation de couleur
380-436	violet	566-589	jaune
436-495	bleu	589-627	orangé
495-566	vert	627-780	rouge



**L'arc en ciel est bien plus étendu que ce qu'on en voit...**



**On en voit que le "visible", sommet de l'iceberg ...**



**Les 6 à 7 nuances de l'arc en ciel forment les couleurs spectrales, mais en fait les frontières restent floues et arbitraires car les transitions sont continues :**



**En Plus, l'œil perçoit d'autres nuances :**

1- des couleurs « désaturées », càd +/- délavées par du blanc, comme les roses, qui sont issus du rouge

$$(r+w)\% \text{ rose} = r \% \text{ rouge} + w \% \text{ blanc}$$

2- des **pourpres**, nuances colorées "**non spectrales**" constituées de mélanges des 2 extrêmes (**violet et rouge**) en % variables

$$(r+vi)\% \text{ pourpre} = r \% \text{ rouge} + vi \% \text{ violet}$$

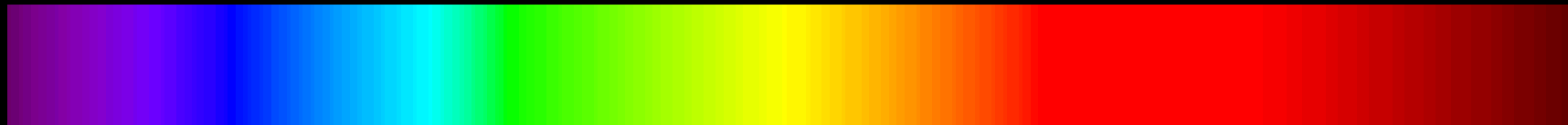
# Généralités sur les sources d'émission de REM

On distingue les **sources primaires** (émission autonome thermique ou quantique) des **sources secondaires** (objets éclairés en partie diffusants et/ou réfléchissants).

Les sources primaires thermiques émettent un spectre visible continu et caractéristique, décrit par la loi de Planck

$$\epsilon_\nu = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

*Ex. : le spectre solaire, partie continue*

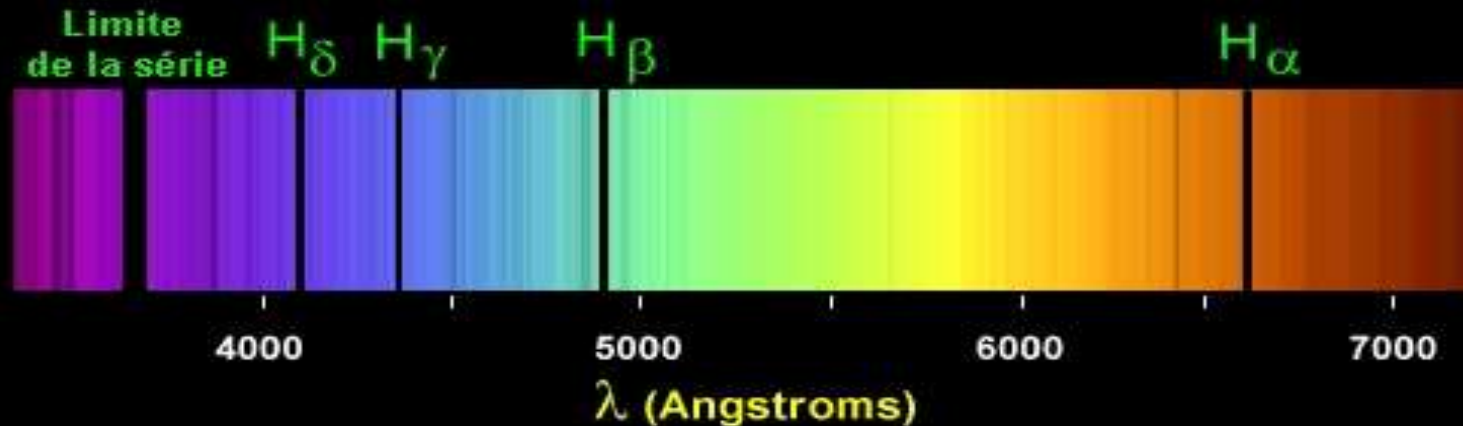


Les sources primaires quantiques émettent un spectre de raies, discontinu  
*Ex. du spectre de la vapeur d'hydrogène, série de Balmer*

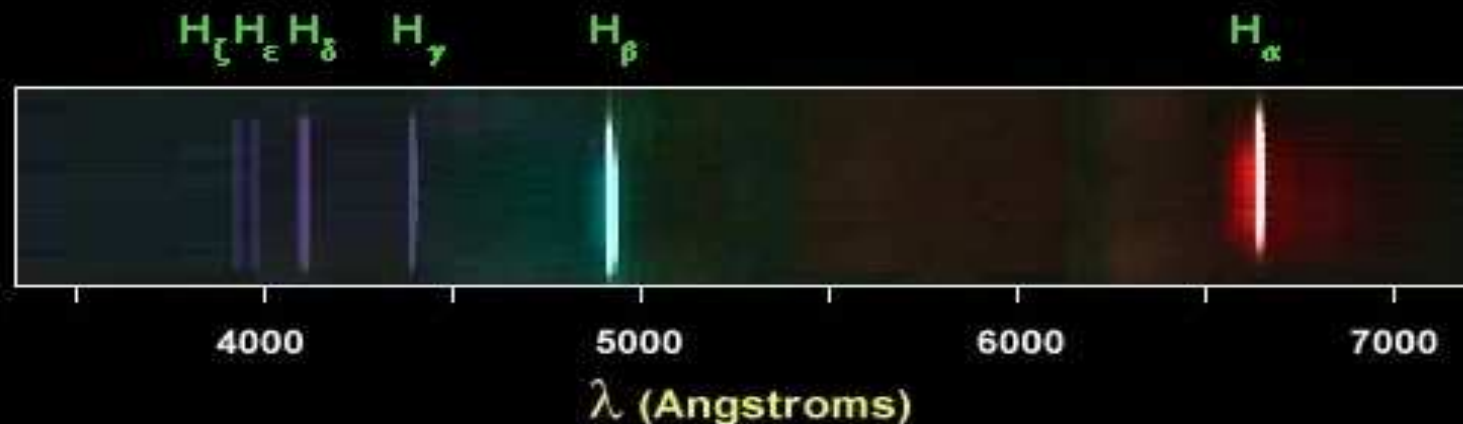


# Exemple de spectres primaires quantiques

La série de Balmer des différents états d'excitation de l'atome d'hydrogène observée en absorption sur le continuum visible....



...et en émission



# Exemple de source primaire quantique

L'oxygène émet en vert (557 nm) dans les Aurores Boréales



# Raie verte de l'oxygène ( 557 nm) dans les Aurores Boréales



# Exemple de source primaire quantique

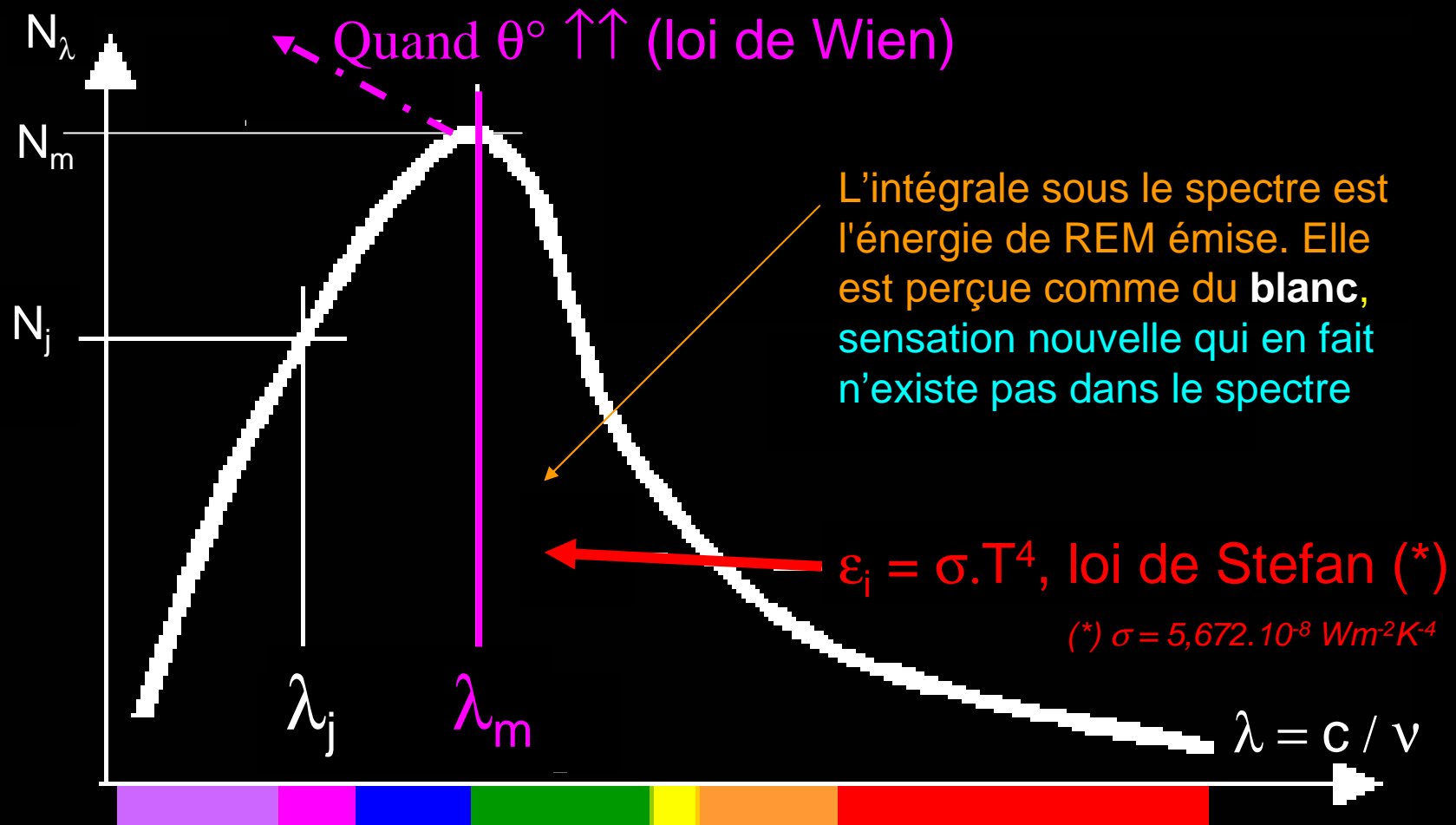
L'oxygène émet plusieurs raies dans les Aurores Boréales  
Singulet vert à 557 nm, doublet rouge à 630-636.4 nm



# Les sources primaires d'émission thermique

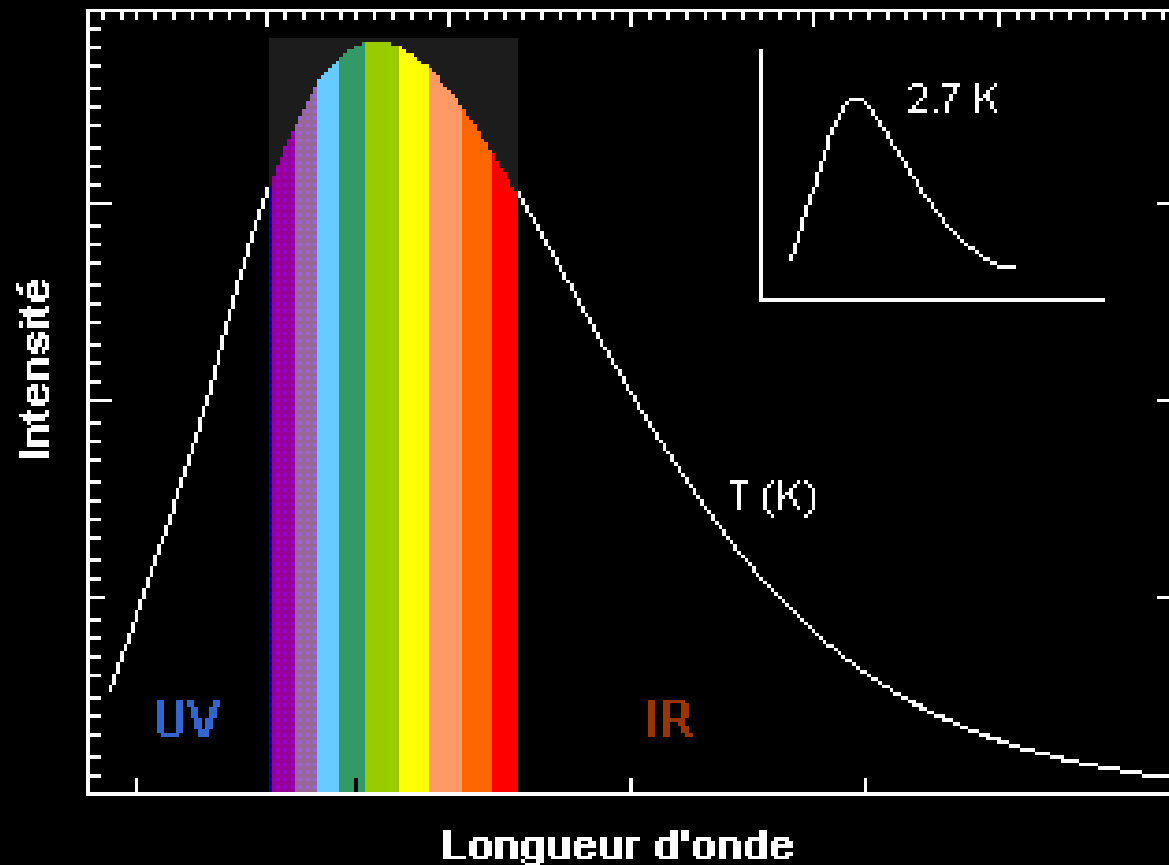
Agitation thermique des électrons (étoiles, lampes à incandescence).

**Spectre continu lié à  $\theta^\circ$  de la source : plus le corps est chaud, plus le spectre est intense et se déplace vers les courtes  $\lambda$**



# Emission d'un corps noir

La forme du spectre est la même quelle que soit la nature de la source, si elle suit la loi de Planck, c'ad émet comme un corps noir  
Comparer le spectre d'émission solaire (5900 K) à celui du fond cosmologique (résidu thermique du Big Bang à 2,7 K) enregistré par le satellite COBE



Seuls  $N_m$  et  $\lambda_m$ , donc la couleur de la source, varient avec la température



# Illustration de l'effet de la température

$de/d\lambda$

Loi de Stefan, si  $T \nearrow$ ,  $N_m$  et  $de/d\lambda \nearrow$

Loi de Wien, si  $T \nearrow$ ,  $\lambda_m \searrow$

8000 K

7000 K

6000 K

5000 K

4000 K

0

200

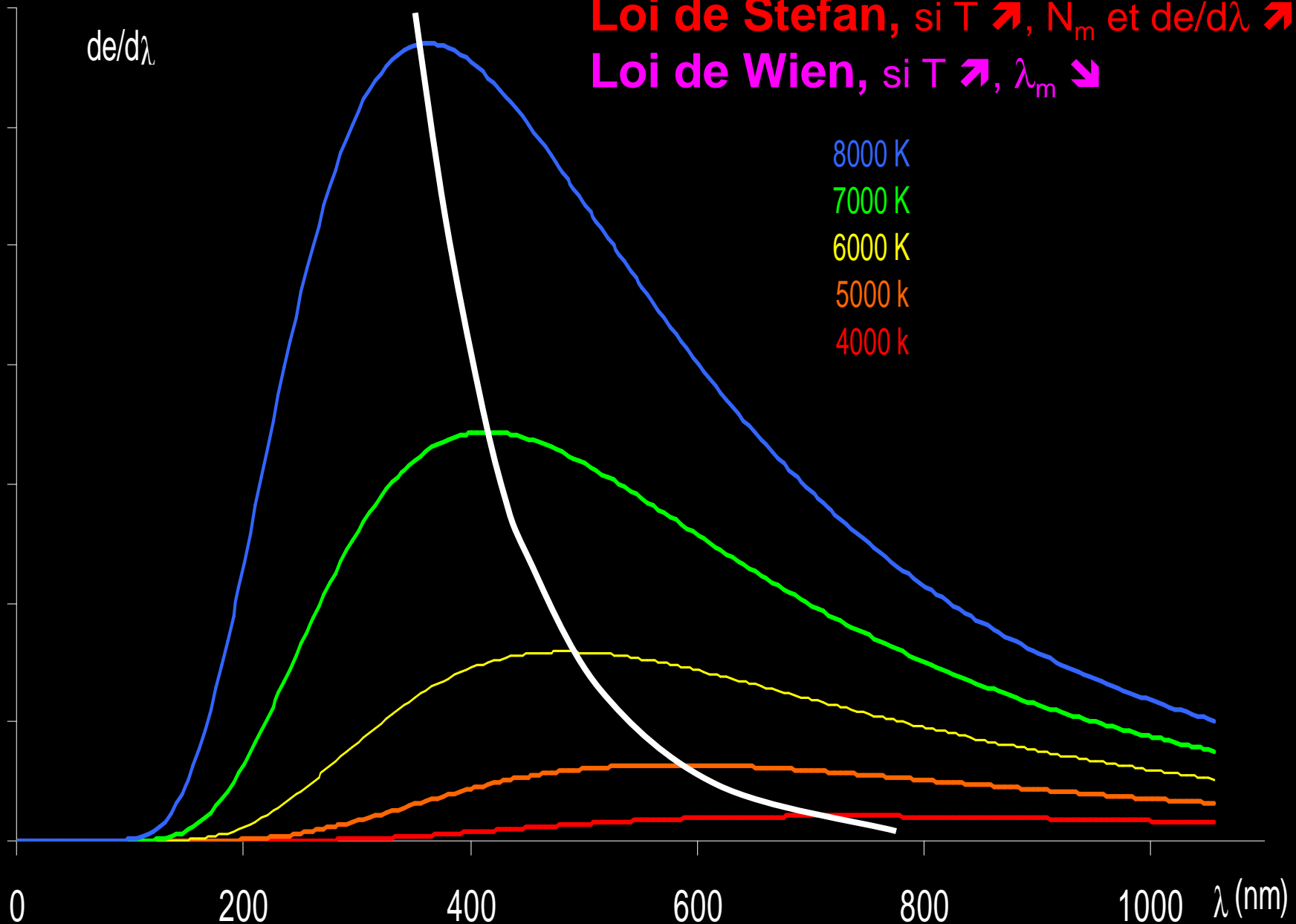
400

600

800

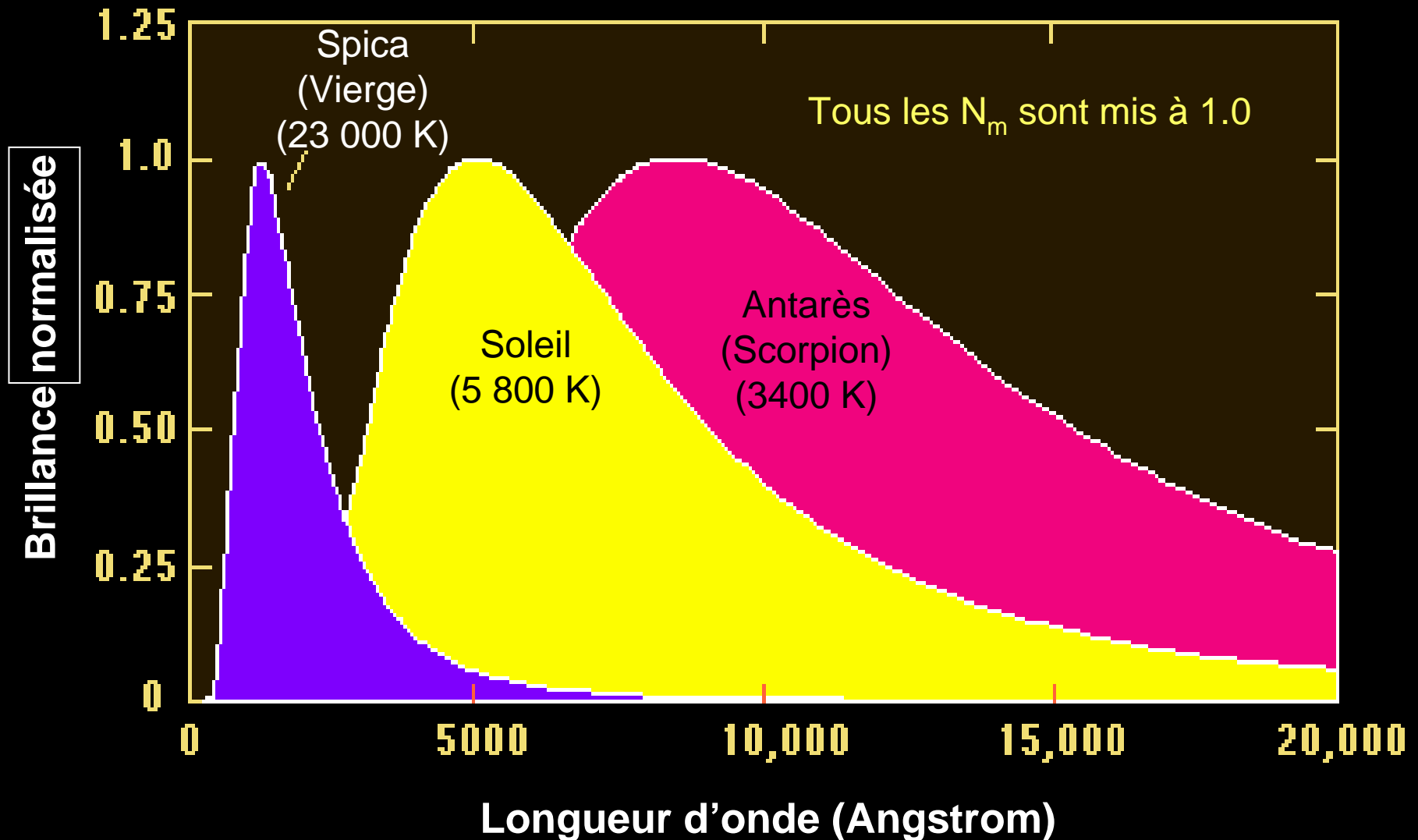
1000

$\lambda$  (nm)



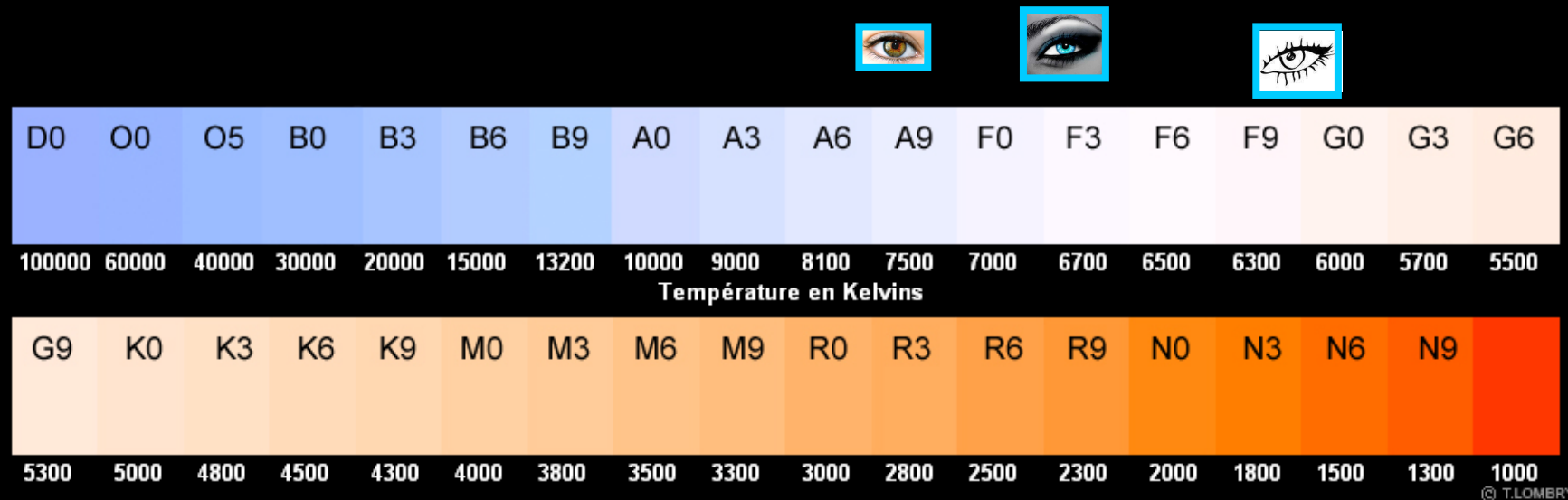
# Réalité de la relation couleur – température

$$\lambda_m - T^{\circ}\text{K} \text{ (loi de Wien)}$$



# Utilisation de la relation couleur – $\theta^\circ\text{K}$

Échelle de couleur étalonnée en température du corps noir correspondant (les brillances sont normalisées)



A la température du Soleil (un peu plus de 6000 K pour la chromosphère), l'œil humain perçoit le jaune-vert normalisé comme du blanc... ce n'est pas un hasard !

# Pièges de la relation couleur – $\theta^\circ\text{K}$ : Température effective et $\theta^\circ$ de couleur

La loi de Wien ne s'applique qu'aux sources thermiques vraies (qui suivent la loi de Planck). Elle donne le lien entre  $\lambda_m$  et  $\theta^\circ$ , ce qui permet de mesurer la **température effective**  $T$  d'une telle source, par ex.  $5800^\circ\text{K}$  en surface du soleil (dominante jaune,  $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ ).

Si la couleur ne correspond pas à un véritable spectre thermique, on utilise la **température de couleur**  $T_c$  ( $T_c \neq T$ ), par exemple  $T_c \approx 6800^\circ\text{K}$  pour un ciel couvert et jusqu'à  $T_c \approx 50\,000^\circ\text{K}$  pour un ciel bleu pur (diffus<sup>o</sup> atmosphérique de Rayleigh en  $1/\lambda^4$ ) alors que  $T \approx -50^\circ\text{C}$  !!

# Pièges de la relation couleur – $\theta^\circ\text{K}$

Un ciel bleu n'est pas à plusieurs dizaines de milliers de  $\text{K}$ , au contraire... Le bleu du ciel n'est pas du à l'émission thermique des molécules d'air (corps noir), mais à la diffusion (Thomson Rayleigh, en  $1/\lambda^4$ ), par ces molécules, de la lumière provenant du soleil (qui, lui, émet comme un corps noir).

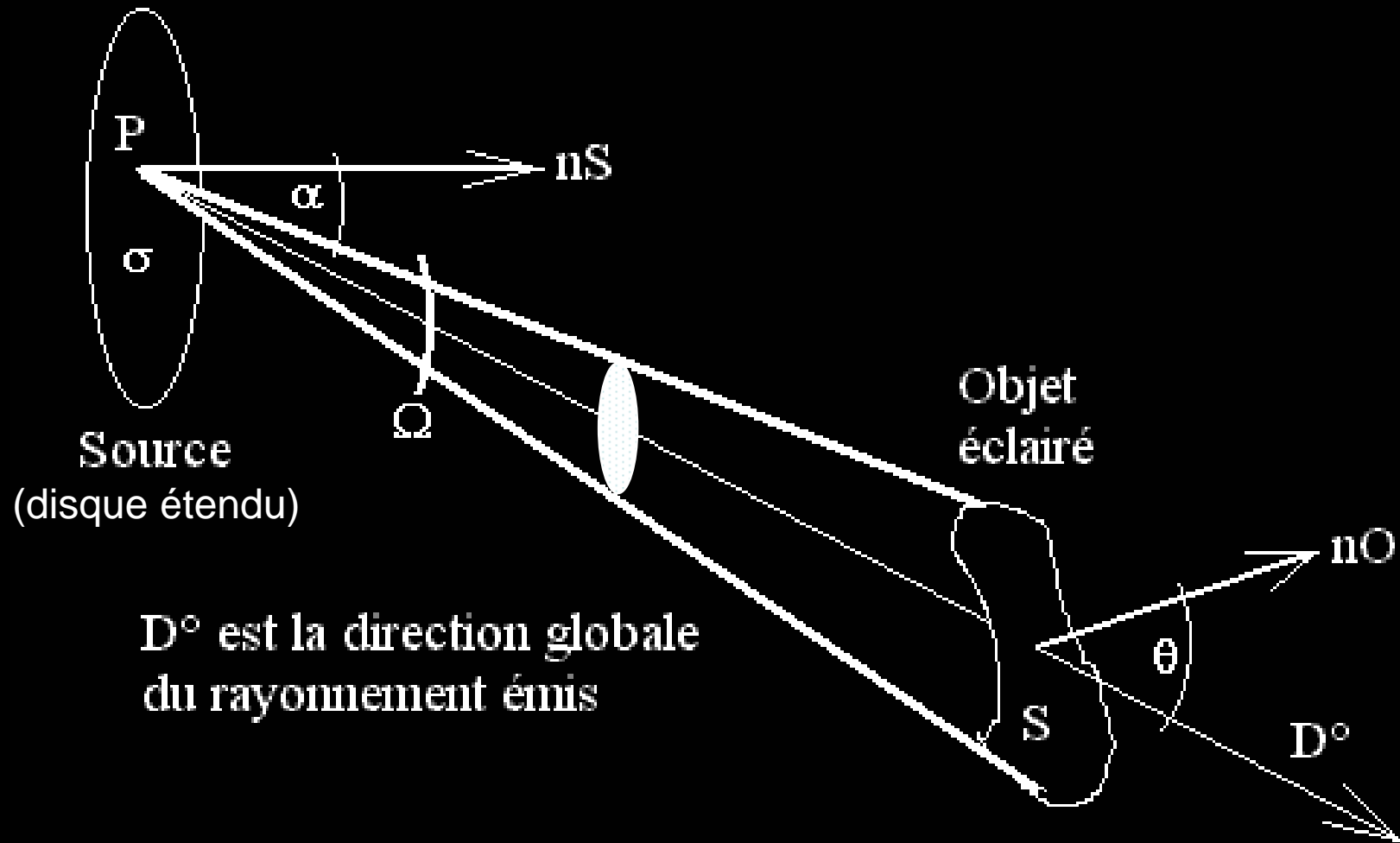
Le spectre solaire qui nous parvient en traversant l'atmosphère est donc appauvri en violet bleu, et ce d'autant plus que plus d'atmosphère est traversée, donc que le soleil est plus bas sur l'horizon... Voilà pourquoi il nous apparaît de plus en plus rouge en se couchant...



# Mesure de la quantité de LUMIERE

**Aspect physique**

# Émission d'une source surfacique composée de multiples points-sources



# GRANDEURS RADIOMETRIQUES (GR)

**Flux énergétique dans le faisceau :**

$$\Phi = d\varepsilon/dt \text{ (Watts)} = E/t \text{ dans } \Delta S$$

**Intensité énergétique émise par le point source  $P_i$  :**  $J_i = \Phi/\Omega \text{ (W.Sd}^{-1}\text{)}$

**Brillance énergétique du disque source :**

$$\beta = \sum_i J_i / \Delta\sigma_{\text{apparente}} = \sum_i J_i / \sigma \cdot \cos\alpha$$

**Éclairement énergétique de l'objet :**

$$E = d\Phi / \Delta S_{\text{apparente}} = \Phi / S \cdot \cos\theta$$



2<sup>ème</sup> partie

La physiologie

# La VISION

## ASPECT RÉTINIEN

**Transformation des grandeurs  
radiométriques (GR) en grandeurs  
photométriques, physiologiques (GP)**

# GRANDEURS PHOTOMETRIQUES (GP)

Qualifiées de "lumineuses", pour les distinguer des grandeurs radiométriques qualifiées d'énergétiques. Le parallélisme est absolu

$$L_{\lambda} = K_{Rt} \cdot \beta_{\lambda} = k_{Rt} \cdot E_{\lambda} \cdot \beta_{\lambda} \quad \text{s'écrit, si} \quad k_{Rt} = k'_{Rt} / E_{\lambda md}$$

$$L_{\lambda} = k'_{Rt} \cdot V_{\lambda d} \cdot \beta_{\lambda} = k'_{Rt} \cdot \beta_{\lambda m}$$

GRANDEURS RADIOMETRIQUES			GRANDEURS PHOTOMETRIQUES		
<b>Flux énergétique</b>	$\Phi$	<i>Watt</i>	<b>Flux lumineux</b>	F	<i>lumen</i>
<b>Intensité énergétique</b>	$J = d\Phi/d\Omega$	<i>W.sd<sup>-1</sup></i>	<b>Intensité lumineuse</b>	I	<i>candela (cd)</i>
<b>Eclairement énergétique</b>	$E = d\Phi/dS$	<i>W.m<sup>-2</sup></i>	<b>Eclairement lumineux</b>	E	<i>lumen.m<sup>-2</sup></i> <i>= lux</i>
<b>Brillance énergétique</b>	$\beta = dl/d\sigma/\cos\alpha$	<i>W.m<sup>-2</sup>.sd<sup>-1</sup></i>	<b>Luminance</b>	L	<i>cd.m<sup>-2</sup></i> <i>= 10 nits</i>

# TRANSFORMATION RÉTINIENNE

- Proportionnalité entre perception et signal : sensation lumineuse (GP) = interprétation du signal (GR) par détecteurs rétiniens (Rt), cônes et bâtonnets :

$$GP = K_{Rt} \cdot GR$$

- Étalonnage de  $K_{Rt}$  :

Une Rt moyenne (œil de référence), éclairée par une source de brillance énergétique  $\beta$  perçoit une quantité de lumière L ou luminance :

$$L = K_{Rt} \cdot \beta$$

# LA LOI D'ABNEY

En 1913, ABNEY formulait un principe expérimental qui est à la base de la colorimétrie théorique.

Selon ce principe, la superposition de flux lumineux monochromatiques,  $\forall \lambda$ , donne un rayonnement monochromatique dont le flux lumineux est égal à la somme des flux lumineux des radiations composantes.

# APPLICATION À LA MESURE DE LA LUMINANCE

Si deux éclairagements de brillance énergétique différente mais variable alternent sur la rétine ( $\nu$  de 6 à 10 Hz), le papillotement provoqué disparaît à égalité de luminances, même pour deux couleurs  $\neq$ .

On constate alors que les luminances, quantités de lumière perçues, sont additives (loi d'ABNEY) :

$$L1 + L2 = L3$$

Mais attention, si  $\nu$  est trop basse, les couleurs restent séparées, alors que si  $\nu$  est trop élevée, on ne distingue plus l'alternance des luminances (fusion cinétique).

# ORDRES DE GRANDEUR DE QUELQUES LUMINANCES

	Luminance (nits)
Ciel nocturne étoilé sans lune	$5 \cdot 10^{-4}$
Ciel nocturne étoilé, pleine lune	$2 \cdot 10^{-2}$
Terre labourée, lumière de midi	1 300
Disque solaire	1 500 000 000

Le rapport des extrêmes est de  $3 \cdot 10^{12}$  !!

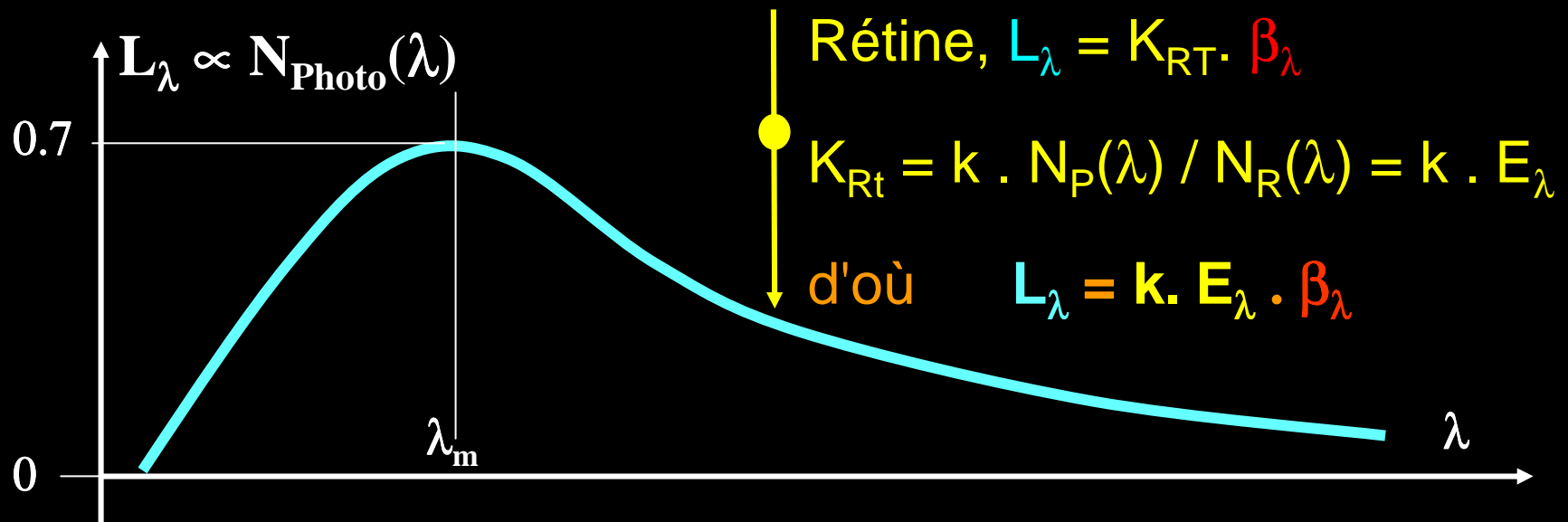
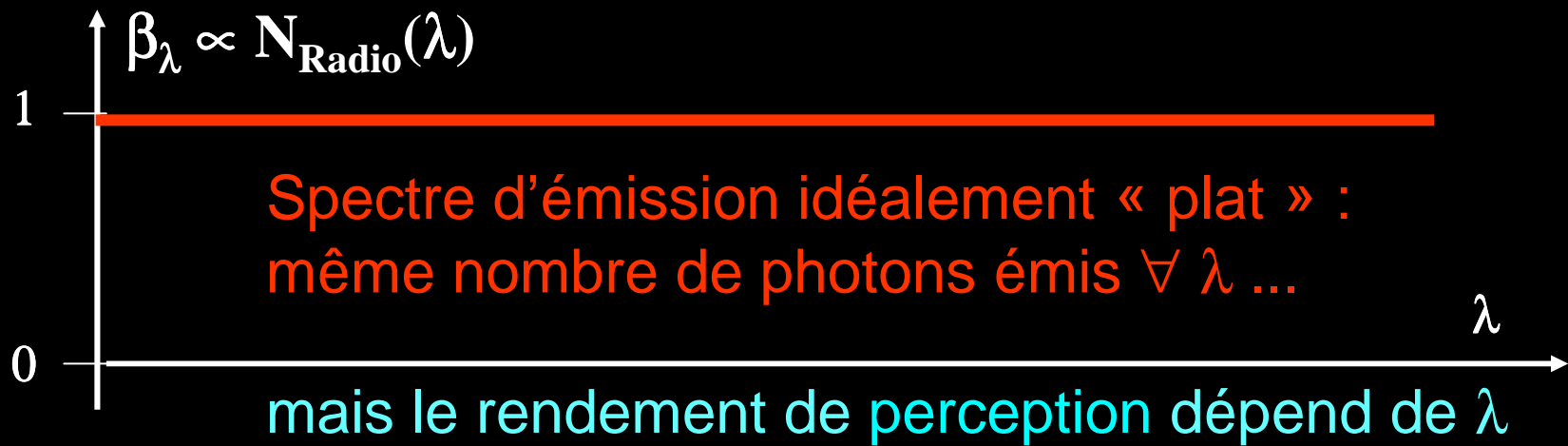
**Efficacité lumineuse**

**et**

**Grandeurs photométriques**

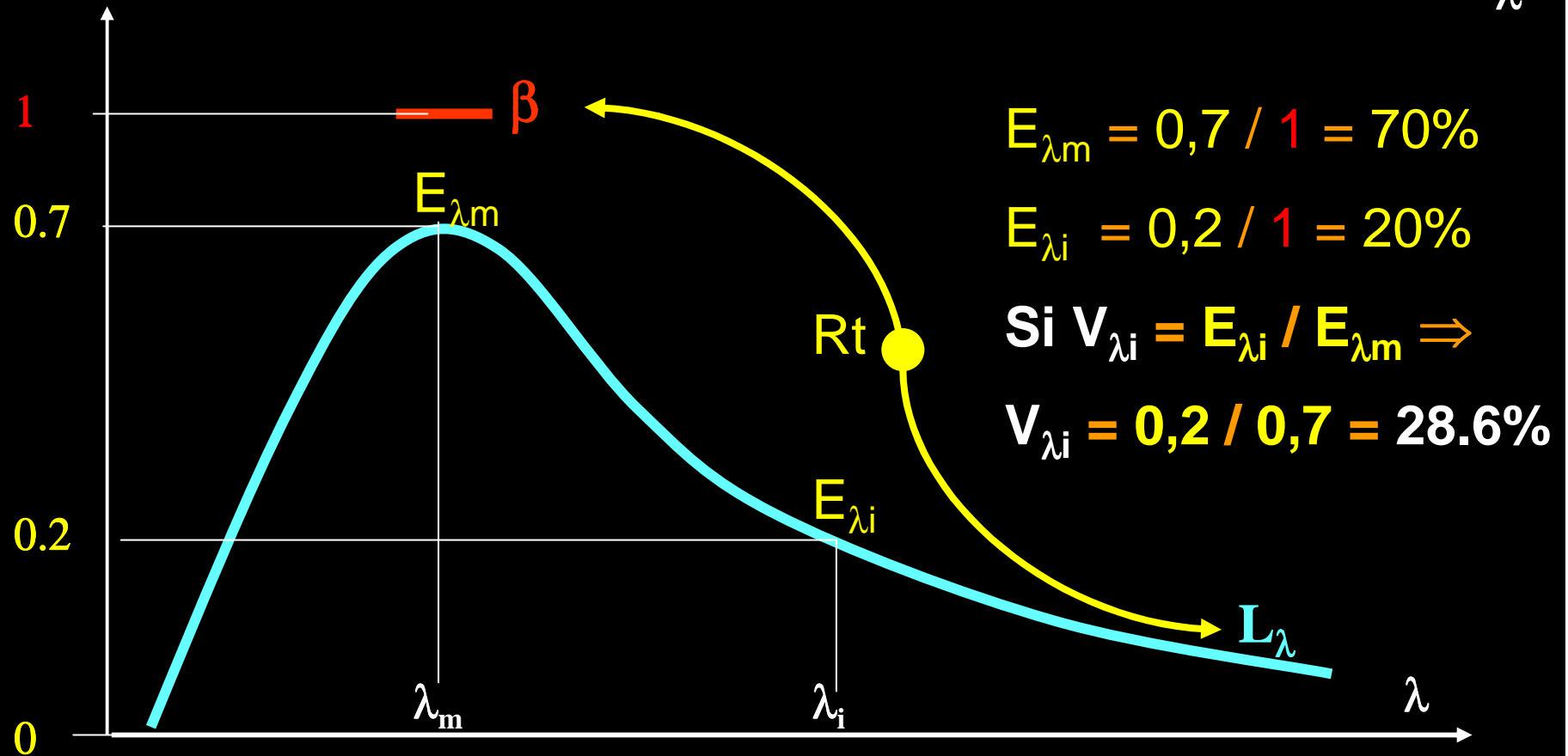


# EFFICACITÉ LUMINEUSE DE LA RÉTINE



$E_\lambda$  est l'efficacité lumineuse de la Rt à  $\lambda$ , k un facteur d'échelle (vision diurne et hautes luminances, nocturne et faibles luminances)

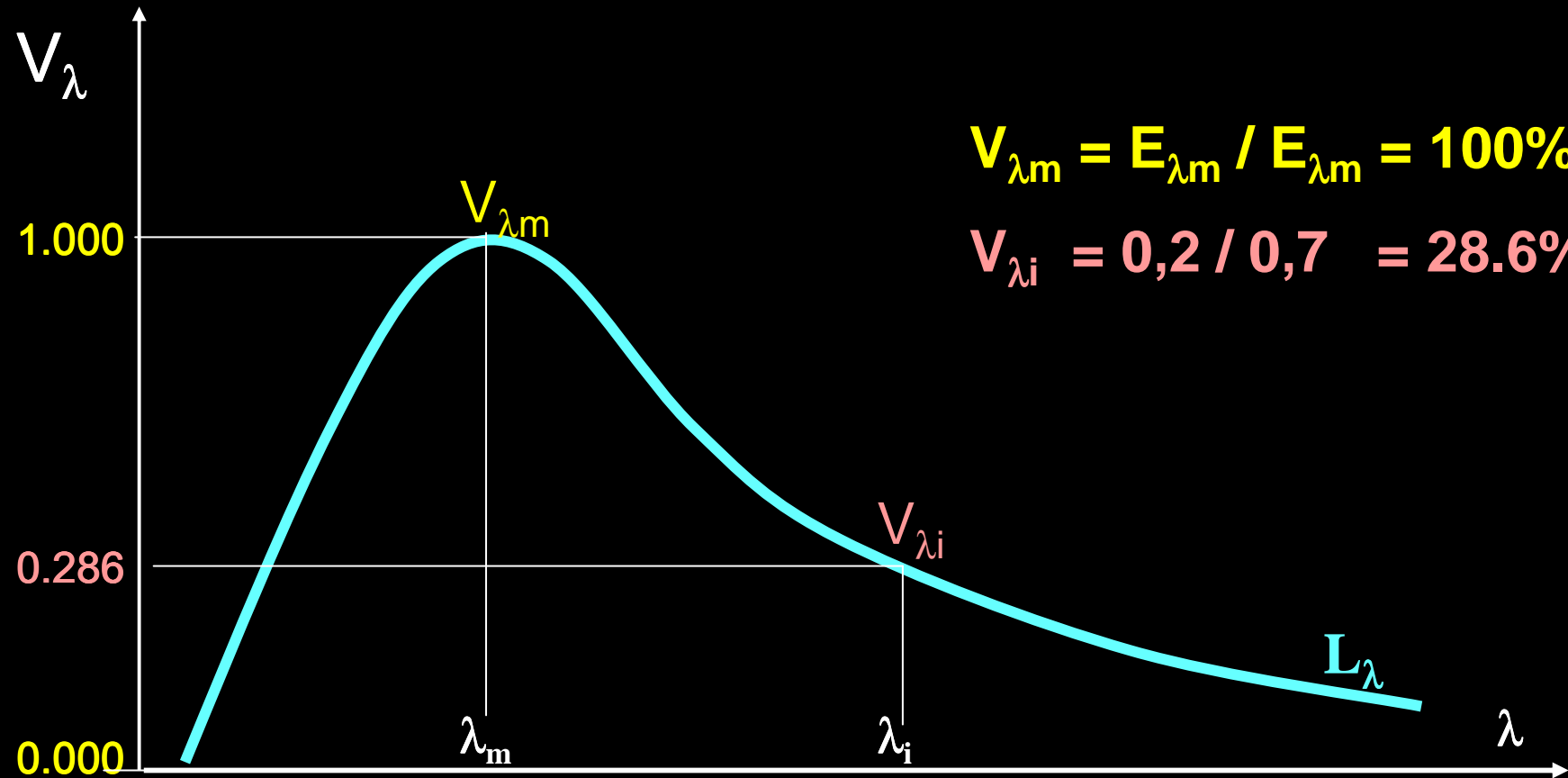
# COEFFICIENT D'EFFICACITÉ LUMINEUSE $V_\lambda$



$E_\lambda$  est maximum (70% de rendement) pour  $\lambda = \lambda_m$

Mais le coefficient d'efficacité lumineuse de la  $R_t$  à  $\lambda$ , défini par  $V_\lambda$ , vaut 100% pour  $\lambda = \lambda_m$  et seulement 28,6% pour  $\lambda = \lambda_i$

# COEFFICIENT D'EFFICACITÉ LUMINEUSE $V_\lambda$



$$V_{\lambda_m} = E_{\lambda_m} / E_{\lambda_m} = 100\%$$

$$V_{\lambda_i} = 0,2 / 0,7 = 28.6\%$$

Le coefficient d'efficacité lumineuse de la Rt à  $\lambda$ , défini par  $V_\lambda$ ,  
... est maximum (100% de rendement) pour  $\lambda = \lambda_m$   
... mais ne vaut que 28,6% pour  $\lambda = \lambda_i$

$V_\lambda$  permet de "normaliser" toutes les courbes individuelles

# COURBES D'EFFICACITÉ LUMINEUSE (1)

$V_\lambda$  signifie que la sensibilité de l'œil à la lumière dépend de  $\lambda$

L'œil est insensible aux IR & UV, + sensible au bleu qu'au rouge

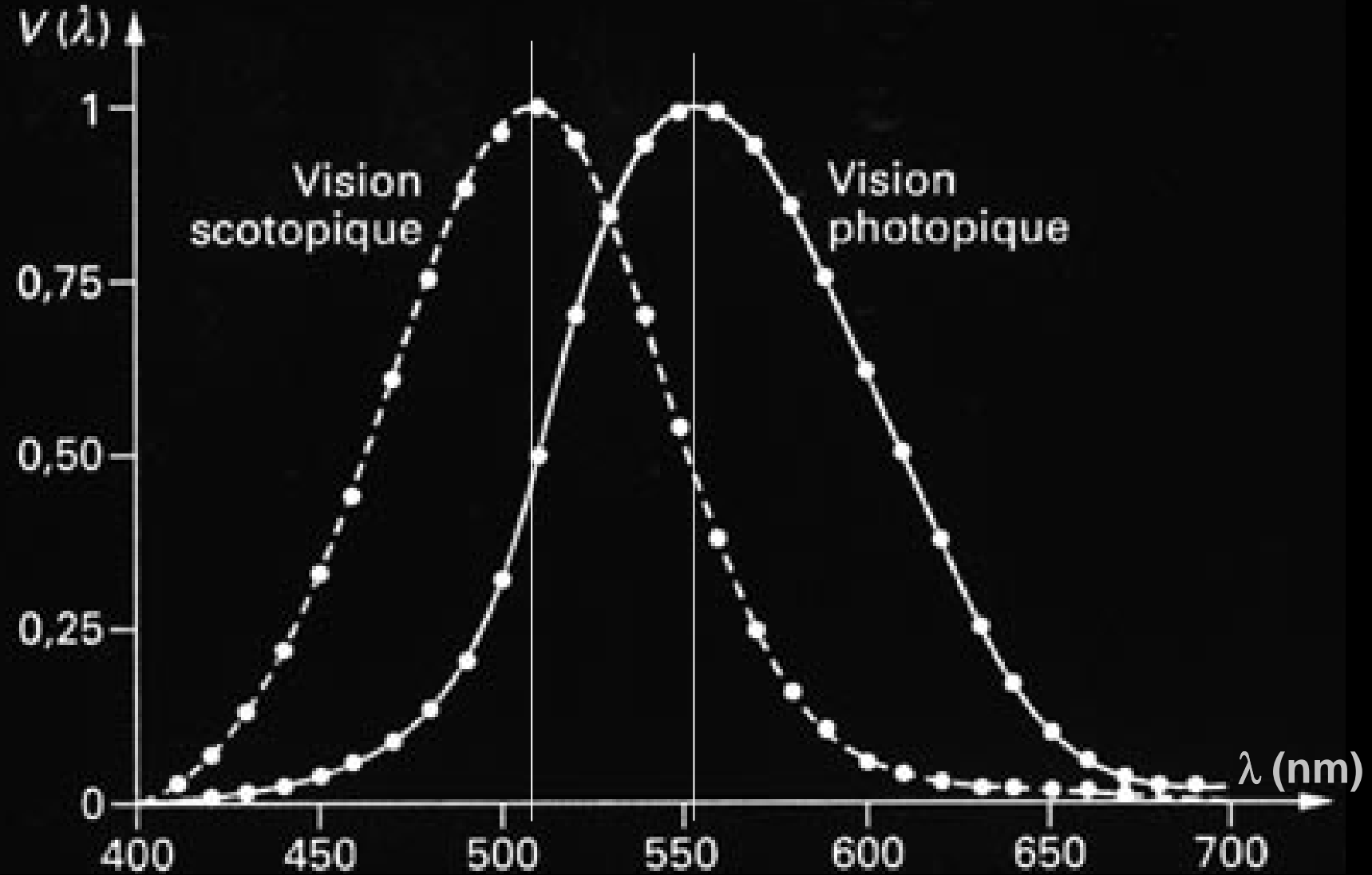
Sensibilité max dans le jaune ( $\lambda_{md} = 555 \text{ nm}$ ) en vision diurne (photopique) et dans le vert ( $\lambda_{mn} = 510 \text{ nm}$ ) en vision nocturne (scotopique)

En fait, les courbes de  $V_\lambda$  en fonction de  $\lambda$  trahissent l'existence de 2 types de photorécepteurs rétiniens :

- les cônes pour la vision diurne (photopique),
- les bâtonnets pour la vision nocturne (scotopique).

Elles montrent en outre que les cônes sont sensibles au jaune (nous sommes nés sous l'étoile Soleil, qui est jaune) et les bâtonnets insensibles au rouge.

# COURBES D'EFFICACITÉ LUMINEUSE (2)



**Adaptation**

**à**

**l'obscurité**

# ADAPTATION À L'OBSCURITÉ (1)

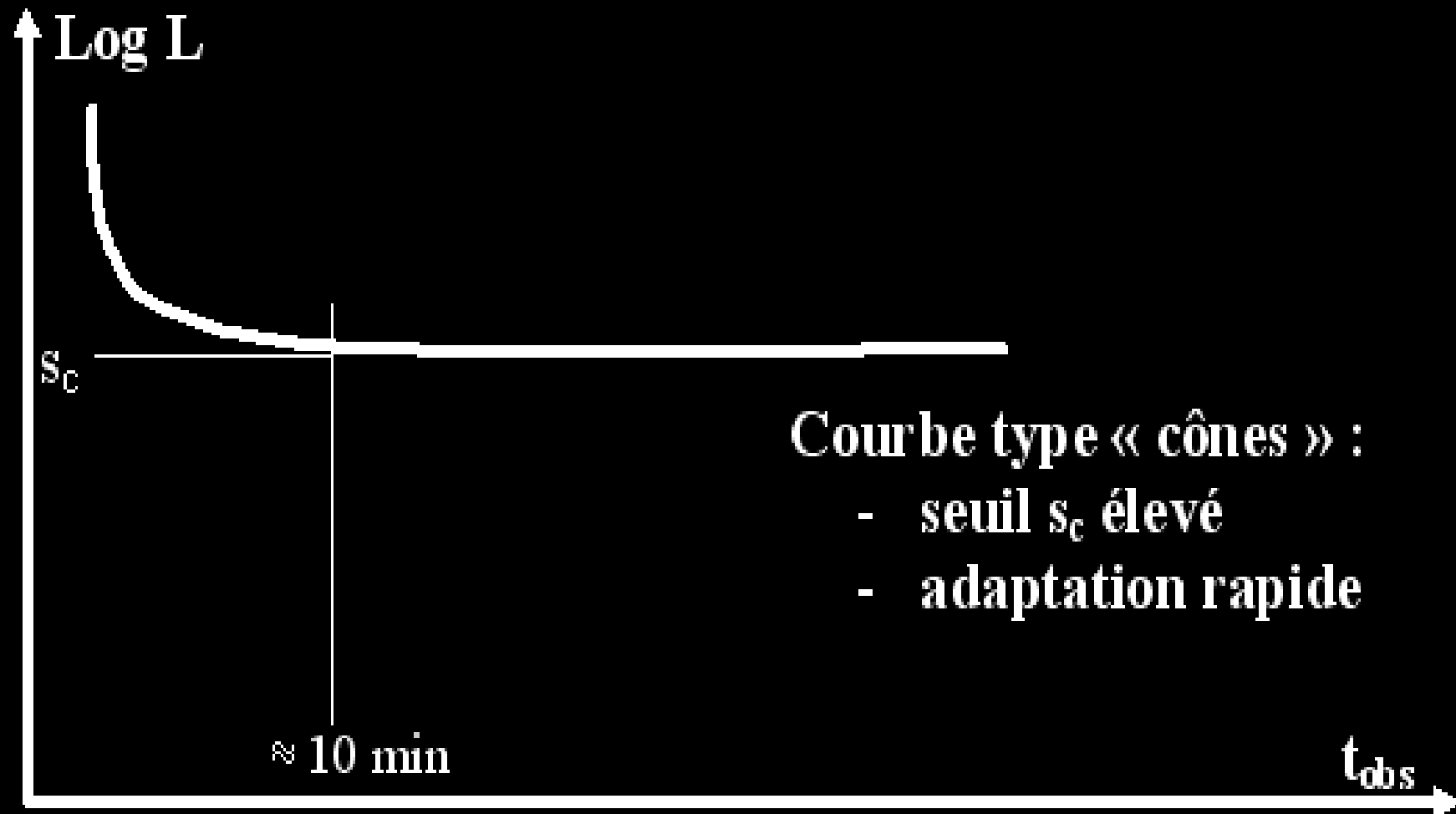
Les courbes d'efficacité lumineuse montrent que les luminances (quantités de lumière perçues) dépendent de la longueur d'onde et de l'éclairement ambiant.

Ce dernier aspect est illustré par l'effet PURKINJE : la nuit ( $E < 10^{-3}$  nits), le bleu paraît plus lumineux que le rouge : la vision nocturne, scotopique (bâtonnets insensibles au rouge) diffère de la vision diurne, photopique, due aux cônes.

On peut donc s'attendre à ce que le passage d'un fort éclairement à l'obscurité (éclairement (très) faible) nécessite un temps d'adaptation  $\pm$  long selon le différentiel, ce que montrent les courbes de HOECHT (luminance d'une source éclairant la rétine ( $R_t$ ) au seuil de détection en fonction du temps passé dans l'obscurité)

## ADAPTATION À L'OBSCURITÉ (2)

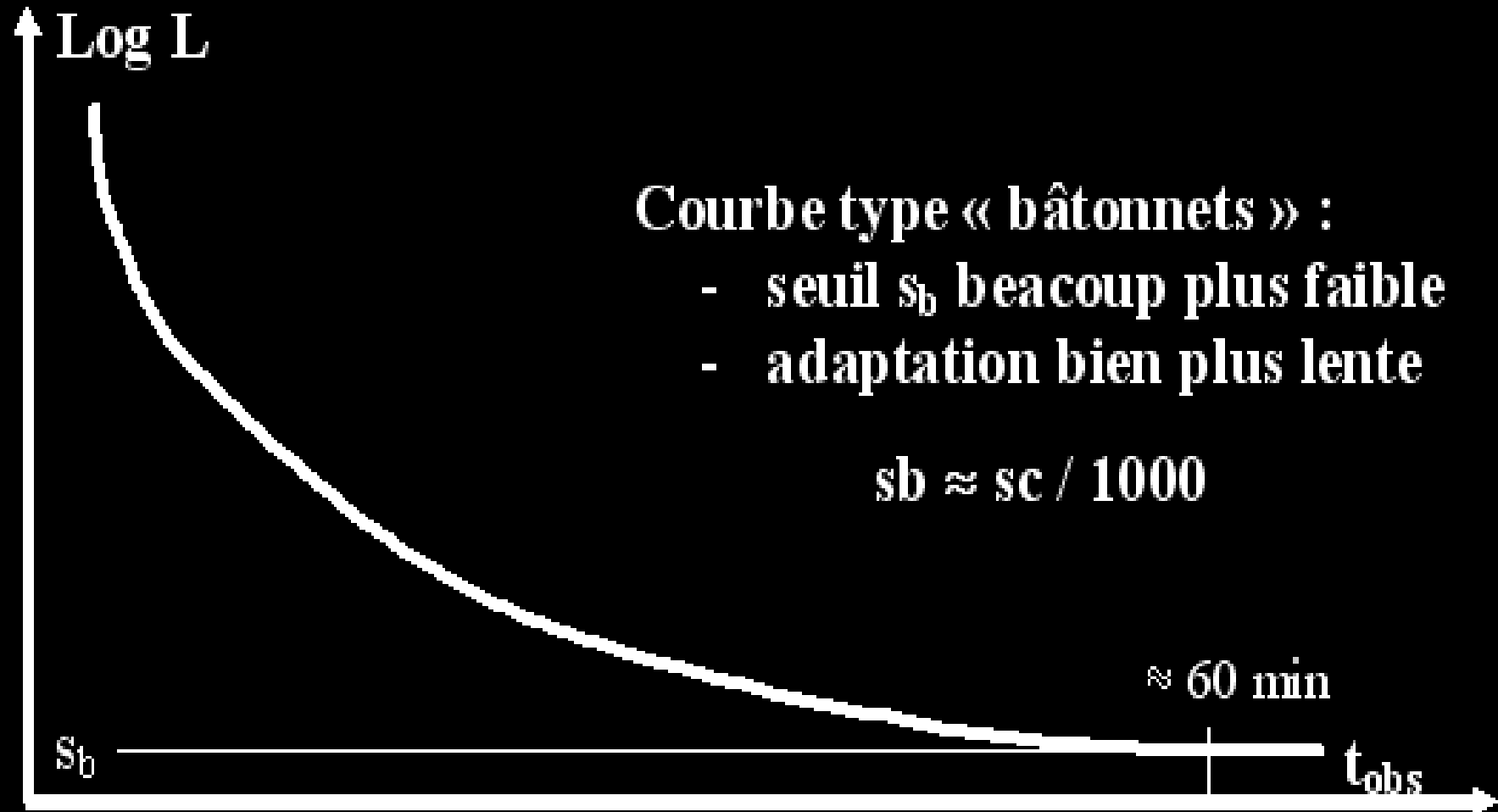
Éclairement Rétinien purement FOVEAL (cônes)  
avec du blanc (mélange polychromatique)





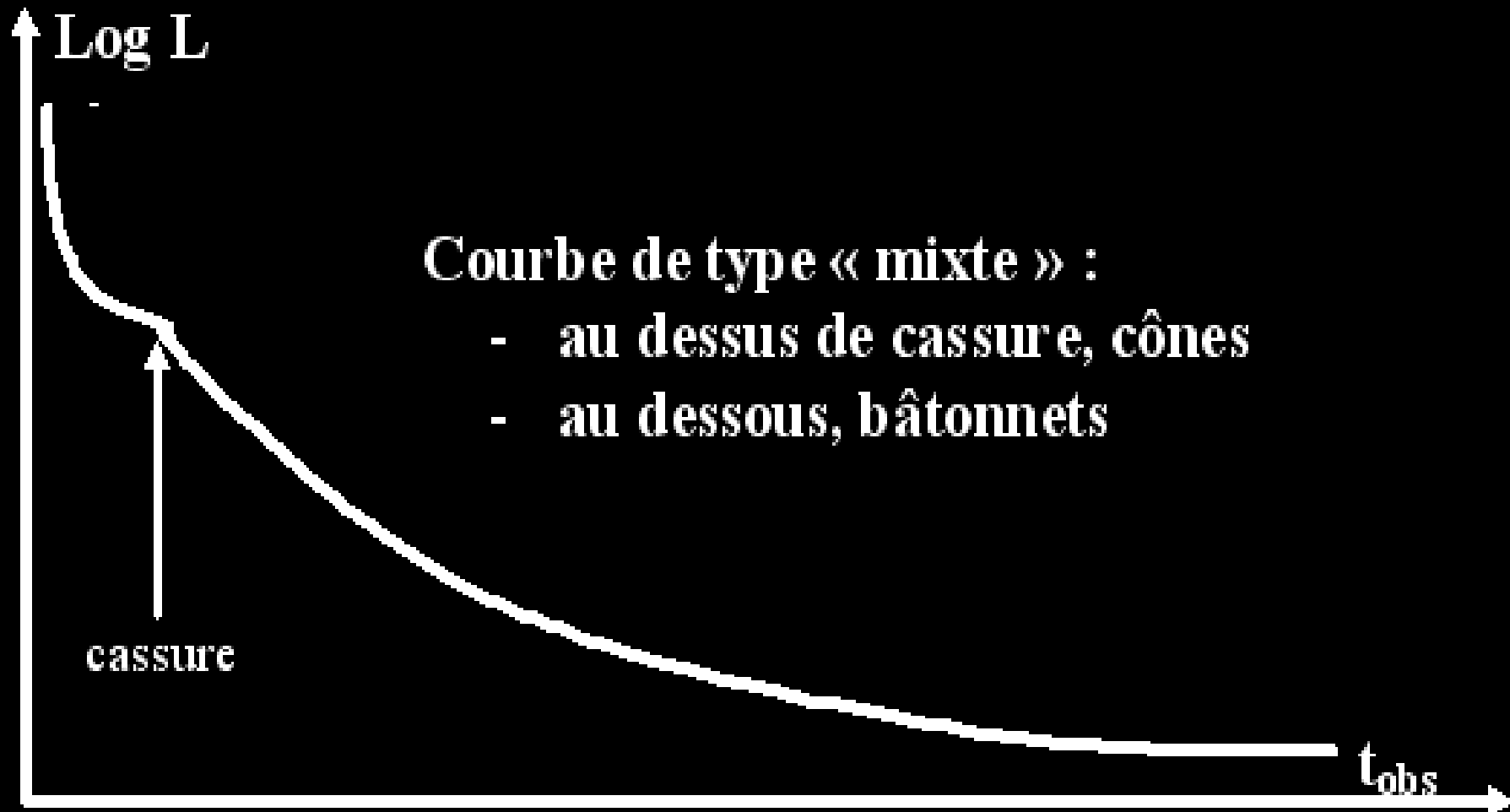
# ADAPTATION À L'OBSCURITÉ (3)

Éclairement Rétinien périphérique (bâtonnets)  
avec du blanc (mélange polychromatique)



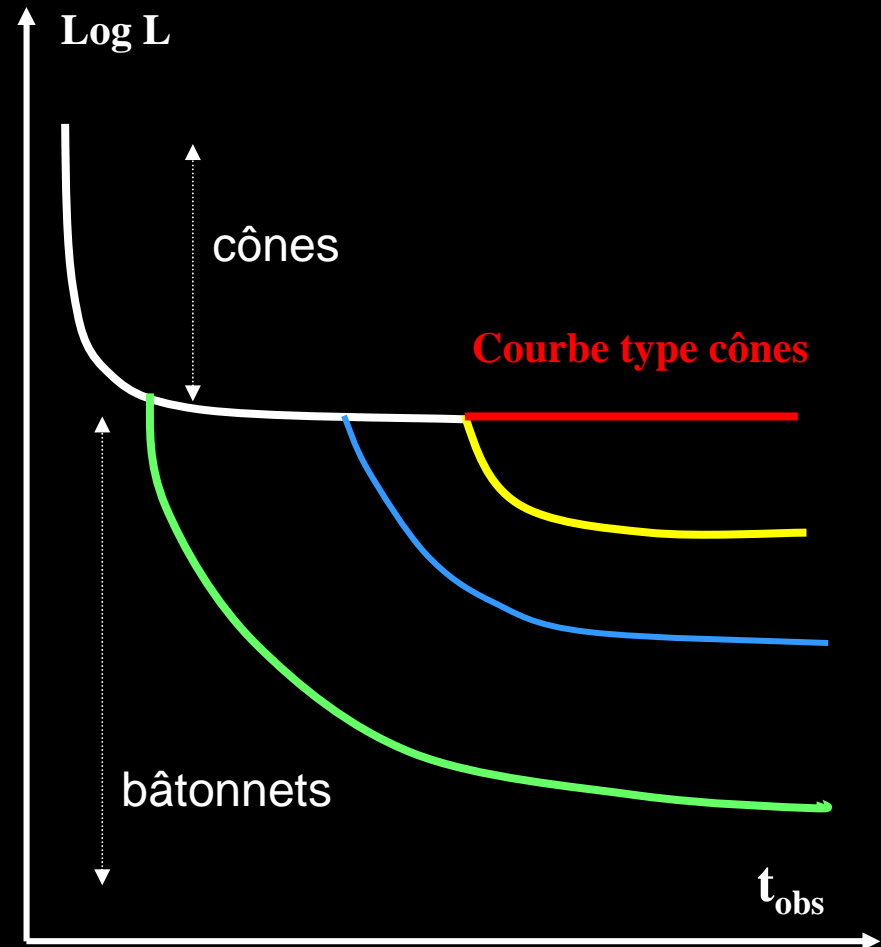
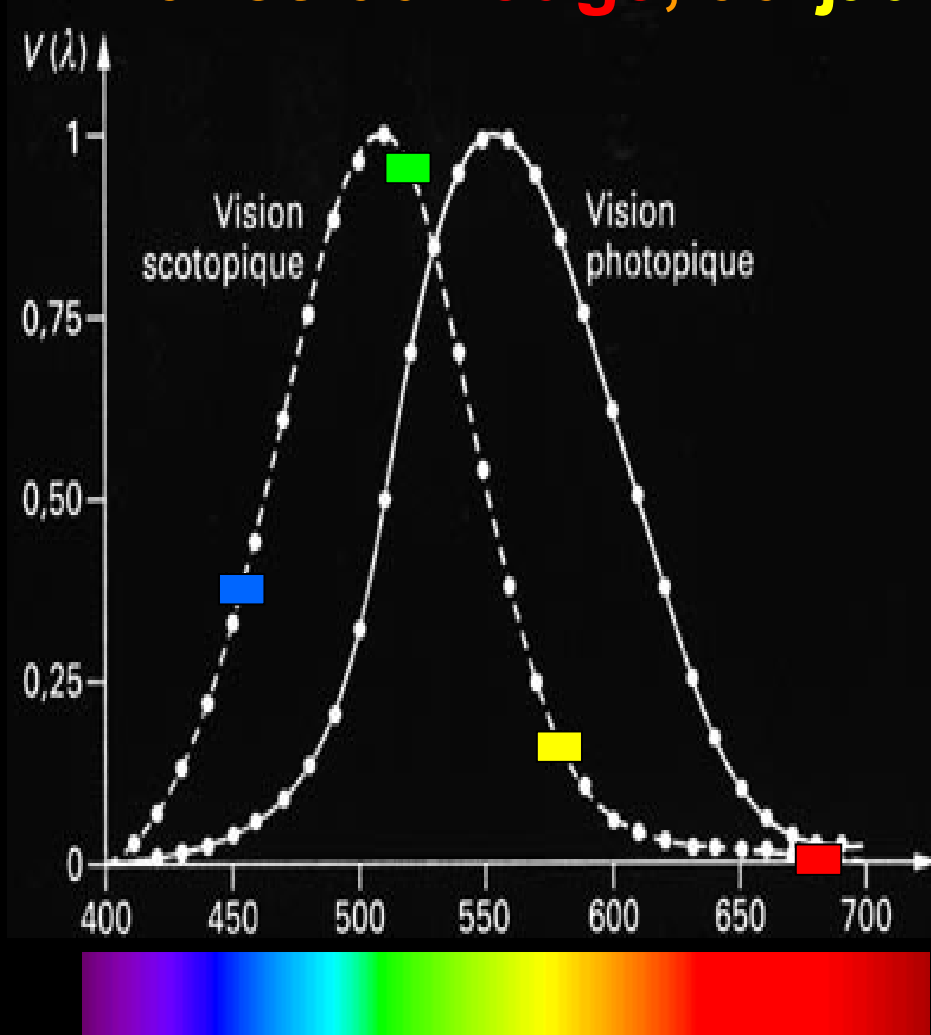
# ADAPTATION À L'OBSCURITÉ (4)

Éclairement Rétinien FOVÉAL et périphérique  
avec du blanc (mélange polychromatique)



# ADAPTATION À L'OBSCURITÉ (5)

Éclairement Rétinien FOVÉAL et périphérique  
avec du rouge, du jaune, du bleu et du vert



# ADAPTATION À L'OBSCURITÉ (6)

## Conclusion

**Les bâtonnets sont insensibles au rouge**

### Corollaires :

- 1- pour ne pas perdre « son pourpre rétinien » la nuit, s'éclairer en rouge
- 2- s'éclairer en jaune la nuit est une erreur, il vaudrait mieux en vert, donc les phares d'automobiles sont plutôt blancs que jaunes

# 3<sup>ème</sup> partie : les couleurs

**LA VISION  
DES  
COULEURS**

# LA VISION DES COULEURS

**L'œil normal perçoit  $\approx$  1700 nuances colorées**

On admet que, par rapport au spectre visible [380 nm à 780 nm], l'essentiel de la perception colorée se situe entre 450 et 750 nm

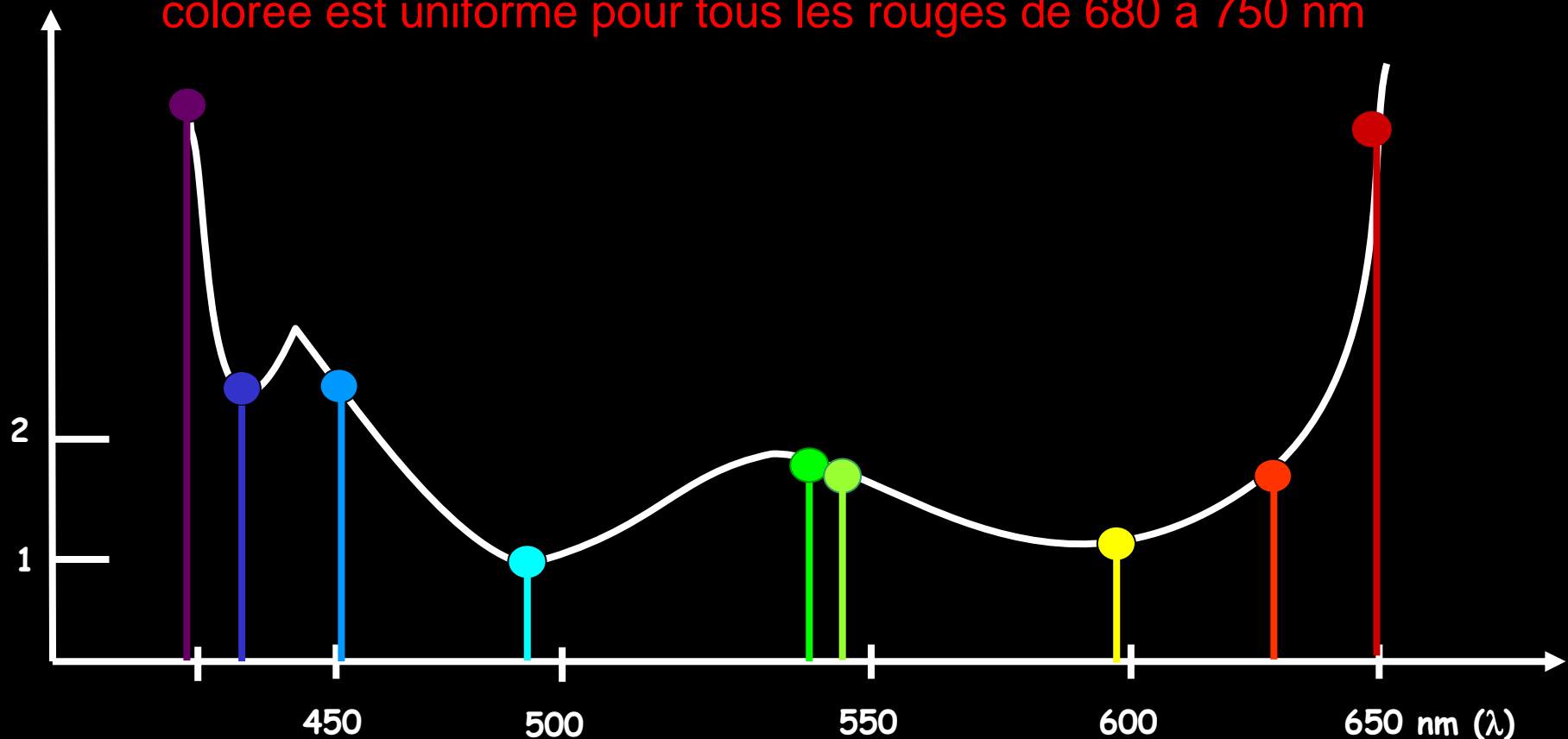
En fait, la rétine est sensible aux UV jusqu'à 350 nm : les aphakes (absence de cristallin) perçoivent les UV comme du bleu-violet

Enfin, les IR intenses sont perçus jusqu'à 1050 nm, comme orangé

# Seuil différentiel de sensibilité colorée

On admet que la perception colorée se situe entre 450 et 750 nm

Le seuil différentiel de sensibilité colorée est élevé dans la fraction bleu-orangé du spectre visible (entre 490 et 590 nm, la rétine humaine peut identifier des couleurs ne différant entre elles que d'un seul nanomètre) mais se dégrade fortement en deçà et au-delà ; en particulier, la sensation colorée est uniforme pour tous les rouges de 680 à 750 nm





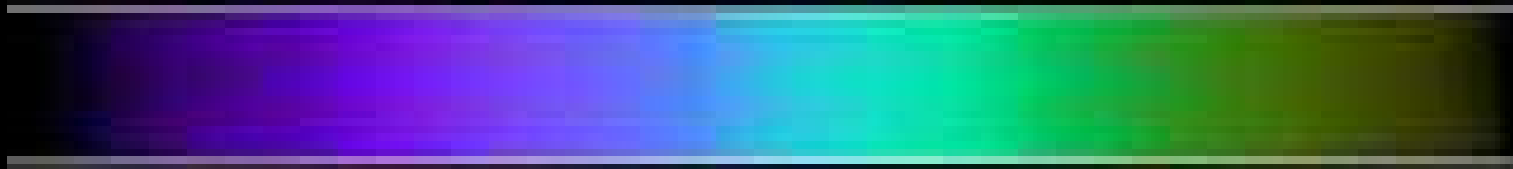
# Seuil différentiel de sensibilité colorée

La perception colorée se situe entre 450 et 750 nm...

...chez l'homme !

mais chez les autres êtres vivant ? ...

*Couleurs visibles par l'abeille*



*Couleurs visibles par l'homme*



**1- Il faut distinguer entre vision de jour (photopique) et de nuit (scotopique) :**

- la vision scotopique (bâtonnets) est achromatique (nuit) ;
- la vision des couleurs est photopique (cônes), indissociable de la perception lumineuse et nécessite donc un éclairage suffisant (jour).

**2- Il existerait 3 types de cônes, permettant la vision des couleurs :**

- à pigment bleu ( $\lambda_{\max} \approx 410$  nm), les moins nombreux, liés au chromosome X ; si absents ou inactifs, *Daltonisme*
- à pigment vert ( $\lambda_{\max} \approx 530$  nm),
- à pigment rouge ( $\lambda_{\max} \approx 560$  nm)

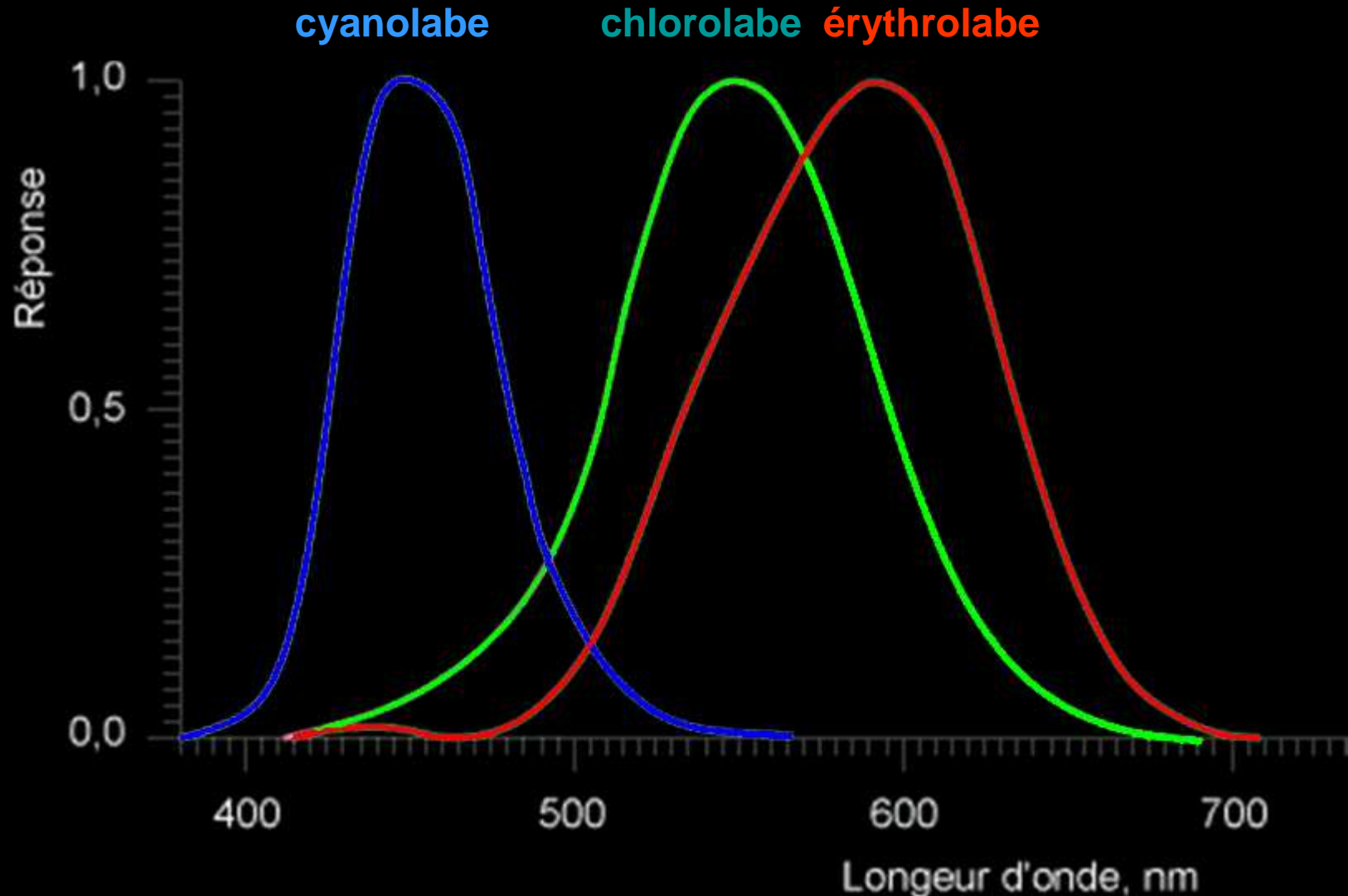
**3- L'expérience montre que la sensation lumineuse est :**

- unique pour un mélange de  $\lambda$ , comme pour une  $\lambda$  unique ;
- totalement caractérisée par 3 variables indépendantes seulement (trivariance visuelle, 3 types de cônes).

**4- Il suffit donc de 3 qualités physiologiques pour décrire tout message sensoriel lumineux : mélange trichrome**

# Les trois types de cônes

Spectres d'absorption normalisée des pigments des cônes



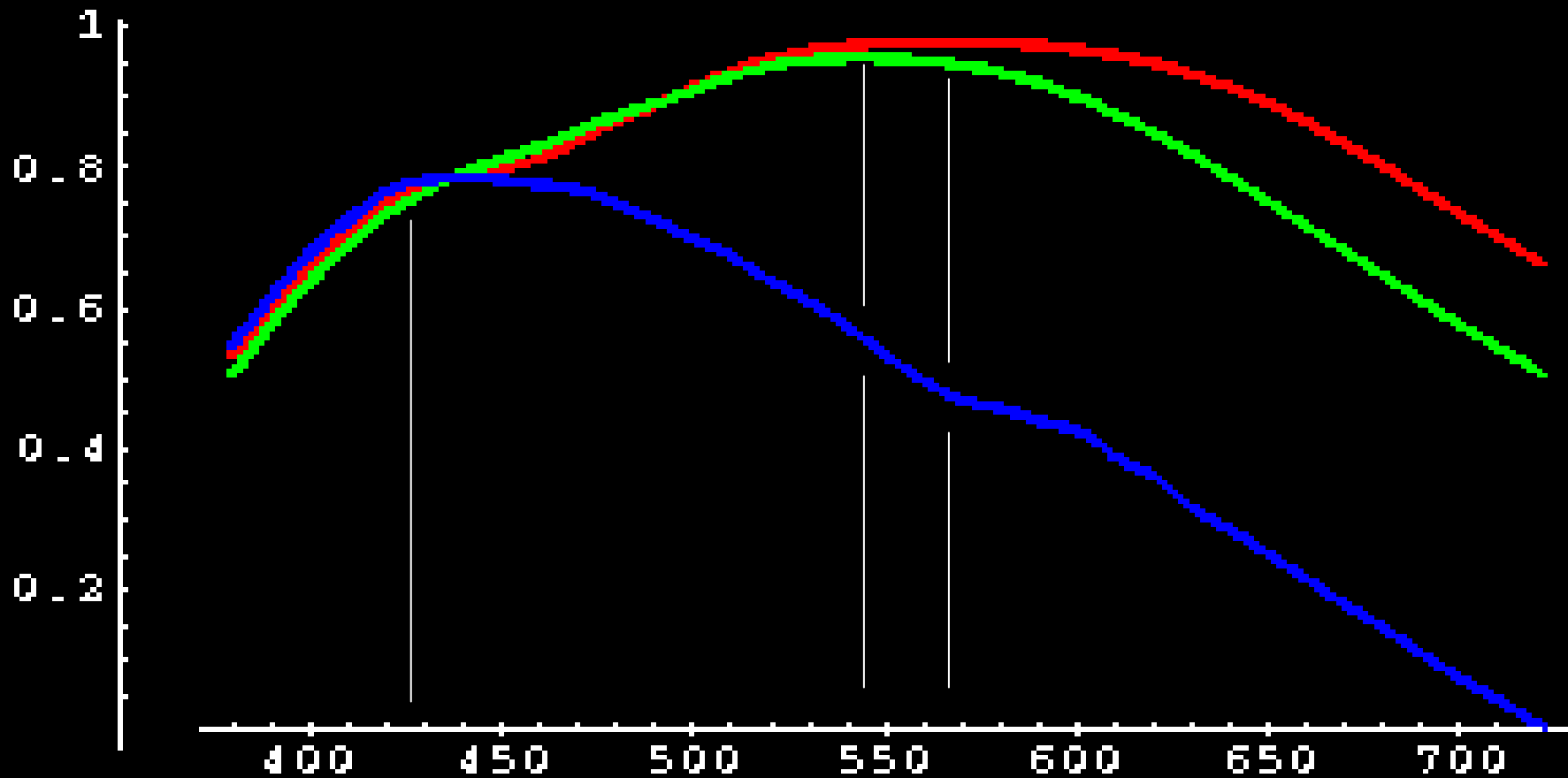
# Les trois types de cônes (2)

Sensibilités spectrales relatives des cônes

cyanolabe

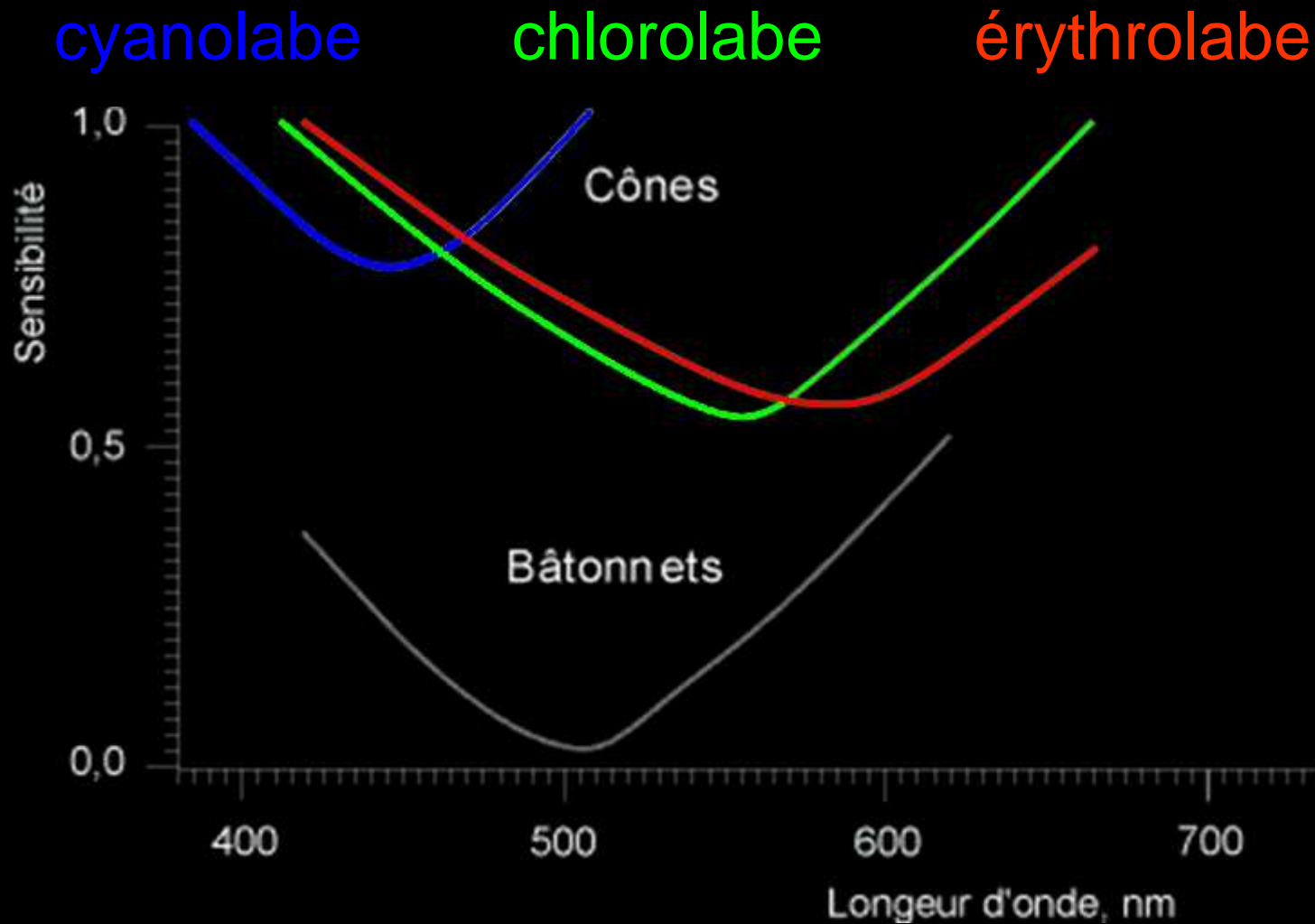
chlorolabe

érythrolabe



# Les trois types de cônes (2)

## Seuils de détection spectrale des cônes & bâtonnets



# LUMINANCE ET TRIVARIANCE VISUELLE

on a vu que la luminance exprime la perception du message sensoriel en tant que sensation lumineuse de la seule brillance énergétique d'une source.

La loi d'ABNEY exprime en outre ce fait remarquable que les luminances sont algébriquement additives

Or, l'existence de 3 types de cônes et l'expérience montrent que la perception visuelle peut être totalement caractérisée par 3 variables indépendantes : on parle de trivariance visuelle

# LE SYSTÈME MONOCHROMATIQUE DE TRIVARIANCE VISUELLE (1)

Les variables de ce système (LTS) rendent compte de 3 qualités physiologiques, mais seule la  $\lambda$  dominante suffit. Ces qualités sont perçues comme immédiates et traduisent l'intensité et la couleur :

- la luminance  $L$ , intensité perçue, est indépendante de la couleur : liée à la quantité et l'énergie des photons, c'est une grandeur mesurable ;
- la tonalité traduit la teinte perçue : non mesurable, cette impression colorée est repérée par rapport à une  $\lambda$  connue produisant la même sensation ;
- la saturation traduit le % de lumière blanche "délavant" la teinte : un rose est un rouge dé saturé...

# LE SYSTÈME MONOCHROMATIQUE DE TRIVARIANCE VISUELLE (2)

Deux notions émergent :

La qualité chromatique (perception des couleurs) est caractérisée par le couple **tonalité/saturation**. Toute sensation lumineuse est alors la superposition de deux quantités complémentaires :

- une de lumière monochromatique ( $L_\lambda$  intensité de la teinte)
- l'autre de blanc  $L_w$  :

$$L = L_\lambda + L_w$$

Le facteur de pureté ( $p$ ) mesure le degré de saturation : il vaut 0 pour le blanc et 1 pour une couleur spectrale pure (non délavée) :

$$p = \frac{L_\lambda}{L_\lambda + L_w}$$



# LUMINANCE ET TRIVARIANCE VISUELLE TRICHROMATIQUE

Selon la norme NF X 08-000, le principe de la trivariance visuelle, s'énonce :

*Un rayonnement de couleur quelconque mais réel, ..., peut être produit visuellement à l'identique, dans des conditions d'observation déterminées, par le mélange algébrique, en proportions définies de manière unique, des flux lumineux de trois rayonnements de couleur réels qui peuvent être arbitrairement choisis, sous la seule réserve qu'aucun d'eux ne puissent être reproduit par un mélange approprié des deux autres.*

# LE SYSTÈME TRICHROMATIQUE DE TRIVARIANCE VISUELLE

Les variables (RVB) utilisées sont moins physiologiques mais physiquement mesurables :

Les couleurs primaires, constituées de 3 teintes spectrales "judicieusement" choisies, ici le rouge, le vert et le bleu : toute sensation lumineuse peut être reproduite par la superposition, en mélange convenable, de ces trois primaires ;

La luminance L reste la première sensation intuitive (intensité lumineuse, plus ou moins intense). Avec les primaires choisies :

$$L_{\nabla} = L_R + L_V + L_B$$

# Le système trichrom(atiqu)e de TV ou RVB

Ce système fait en fait directement allusion aux 3 types de cônes : toute sensation colorée peut être générée par un mélange convenable de 3 teintes ( $\lambda$ , couleurs) primaires, un Rouge à 700 nm, un Vert à 546 nm et un Bleu à 436 nm :

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_R + \mathbf{L}_V + \mathbf{L}_B$$

On perçoit en fait une teinte unique, plus ou moins délavée, et

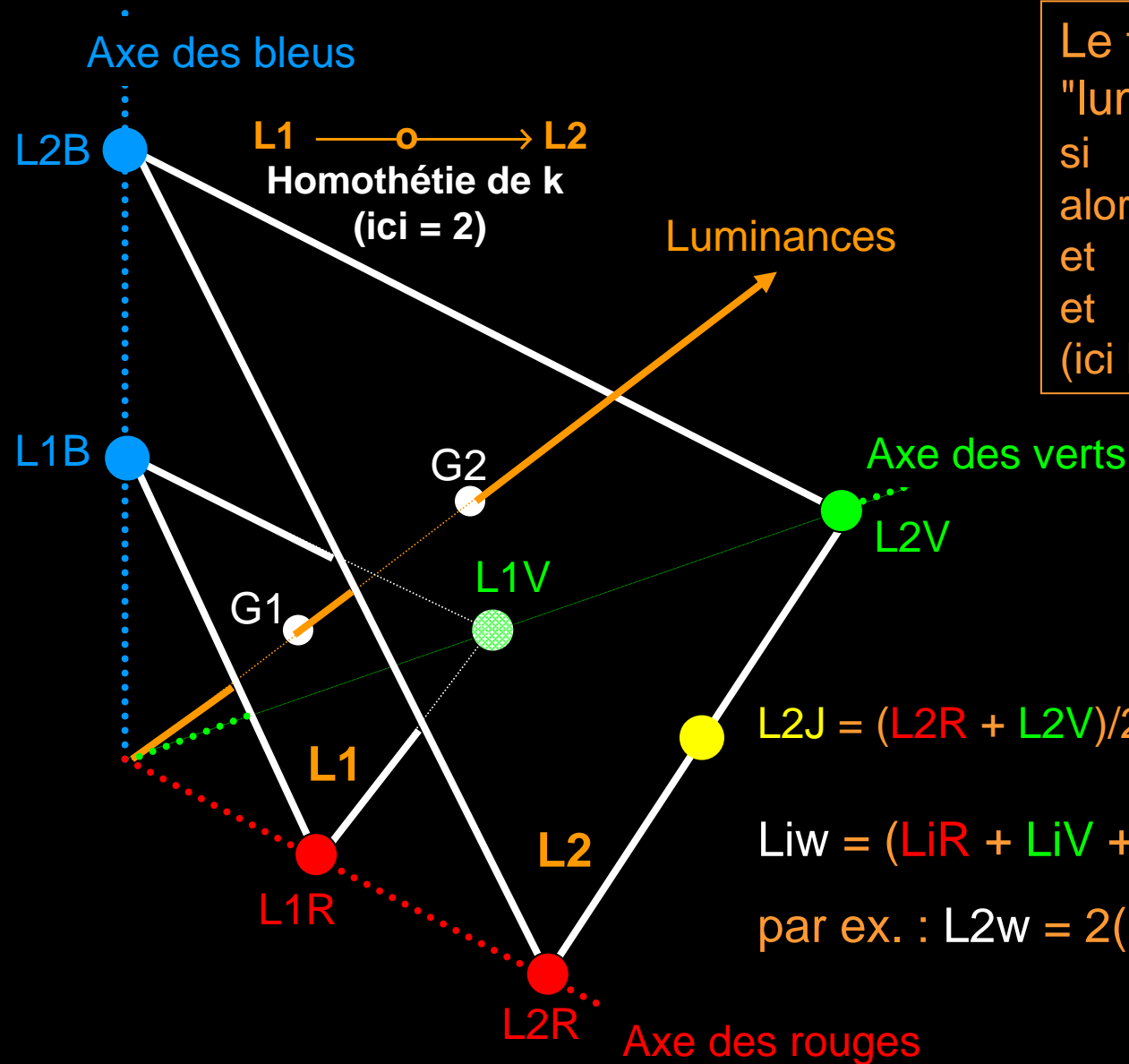
$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_\lambda + \mathbf{L}_w$$

Il existe un seul mélange particulier et unique qui donne du blanc :

$$\mathbf{L}_w = \mathbf{L}_{Rw} + \mathbf{L}_{Vw} + \mathbf{L}_{Bw}$$

Ce système est représentable par triangle (isoluminance) des couleurs, où tout mélange de couleur appartient au triangle

# Triangles isoluminances des couleurs



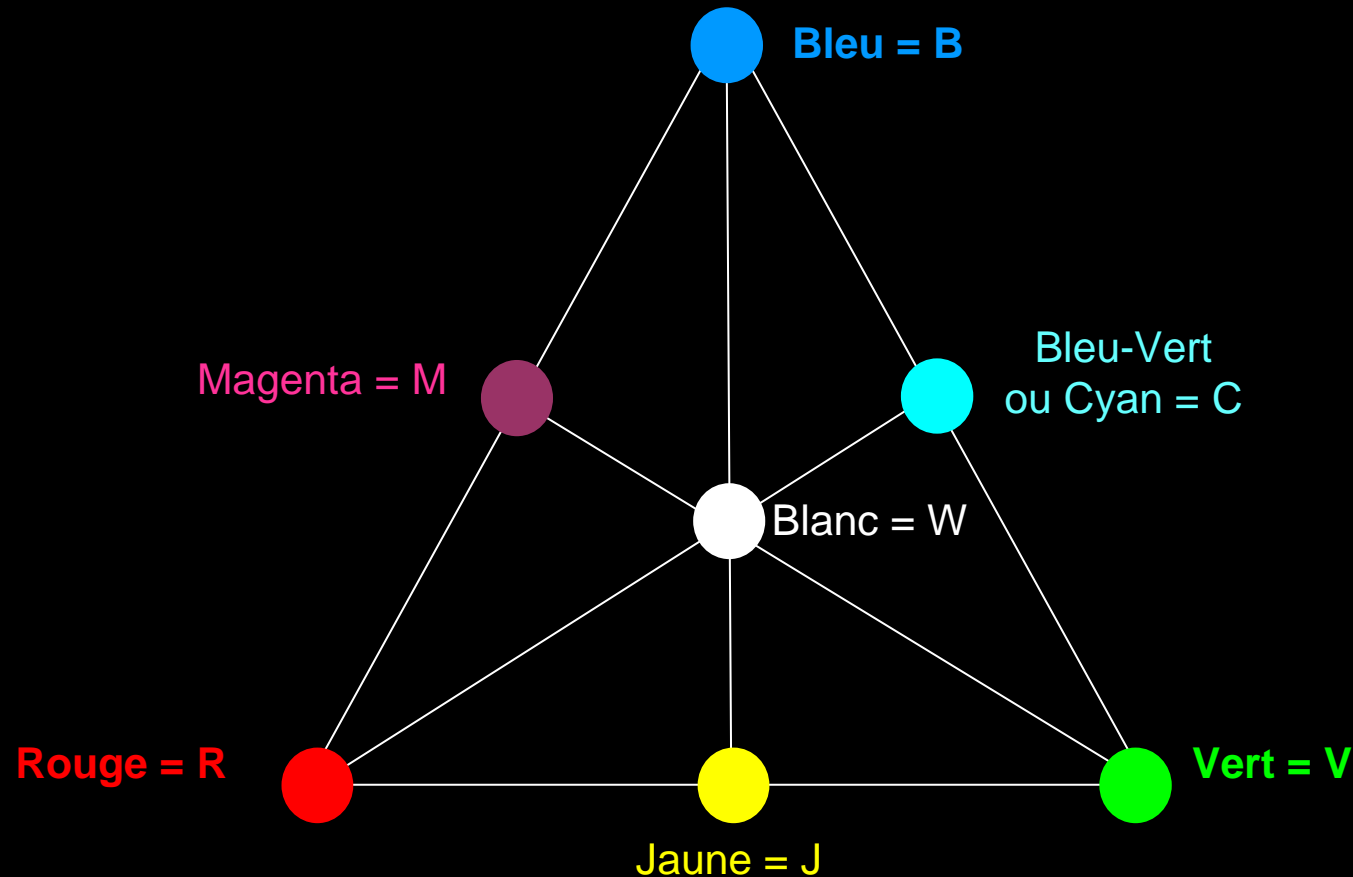
Le triangle 2 est plus "lumineux" que le 1 :  
 si  $L2 = k.L1$ ,  
 alors  $L2R = k.L1R$ ,  
 et  $L2B = k.L1B$ ,  
 et  $L2V = k.L1V$   
 (ici  $k = 2$ )

$$L2J = (L2R + L2V)/2 = L1R + L1V$$

$$Liw = (LiR + LiV + LiB)/3, i = 1, 2 \dots$$

$$\text{par ex. : } L2w = 2(L1R + L1V + L1B)$$

# Triangle isoluminance des couleurs



Deux couleurs sont complémentaires quand leur mélange additif donne du blanc (la ligne qui les joint passe par le blanc) :

$$L_w = J + B$$

# Les lois de GRASSMAN

La synthèse trichrome considère les luminances comme des grandeurs algébriques. Grassman utilise donc les lois arithmétiques classiques pour décrire les sensations physiologiques de vision des couleurs :

si  $L_1 = L_2$ , alors  $k.L_1 = k.L_2$  et  $L_1 + L_3 = L_2 + L_3$

Une combinaison de sensations visuelles est perçue comme une sensation unique, tonalité +/- désaturée, combinaison algébrique des sensations mélangées.

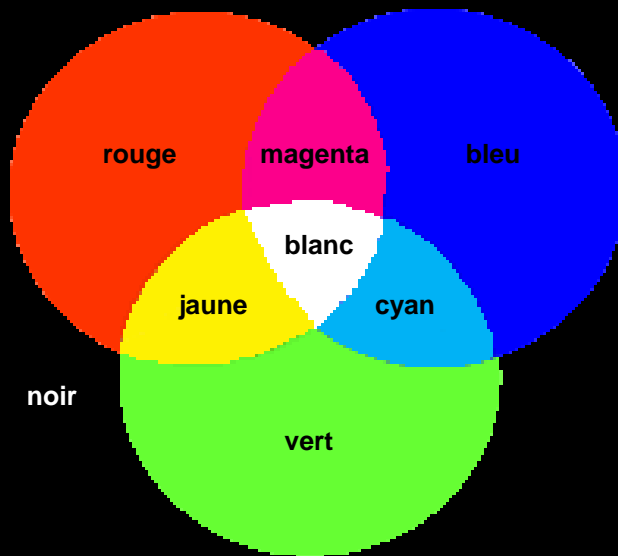
Si le blanc qui "compose" une tonalité désaturée est issu d'une synthèse trichrome, cette tonalité désaturée  $L_\lambda + L_w$  fournira, par déduction algébrique, la tonalité saturée  $L_\lambda$  :

$$L_\lambda = L_R + L_V + L_B - L_w \quad \text{ou}$$
$$L_\lambda = (L_R - L'_R) + (L_V - L'_V) + (L_B - L'_B)$$

# Sensation lumineuse unique pour 1 mélange de $\lambda$

## Mélanges additif

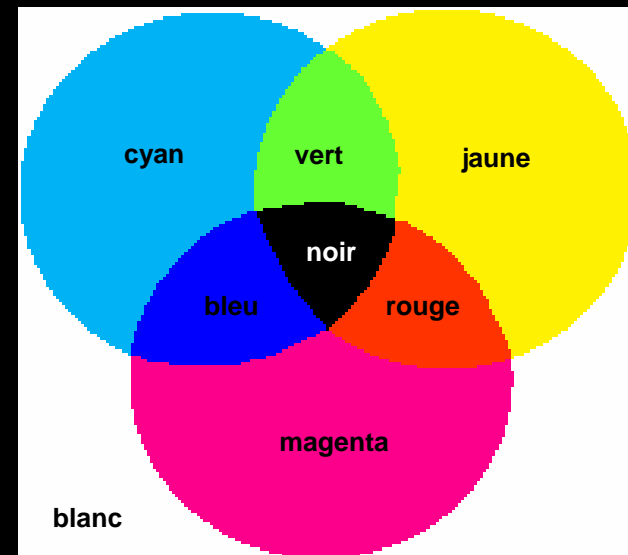
L'addition "au noir" de deux  $\lambda$  proches donne l'impression colorée d'une  $\lambda$  intermédiaire : on peut reproduire le **jaune** par mélange de **rouge** et de **vert**. Le mélange de 3  $\lambda$  choisies (couleurs fondamentales) donne du blanc



2 couleurs opposées % blanc sont complémentaires

## Mélanges soustractif

Ôter une  $\lambda$  au blanc laisse la  $\lambda$  complémentaire : ôter du **rouge** laisse du **cyan**, du **vert** laisse du **magenta**, du **bleu** laisse du **jaune**. Ôter les trois (càd du blanc), il ne reste que du noir (peintres)



2 couleurs complémentaires restent opposées mais % noir

# Les différentes couleurs perçues

## 1- Les couleurs spectrales

Générées par une  $\lambda$  unique (monochromatisme) retrouvée dans le spectre visible [400, 700 nm]

À chaque couleur est associée une  $\lambda \neq$  (spectre de raies)

Passage continu (spectre thermique), graduel, avec  $\approx$  200 nuances colorées, de facteur de pureté  $p = 1 \forall \lambda$

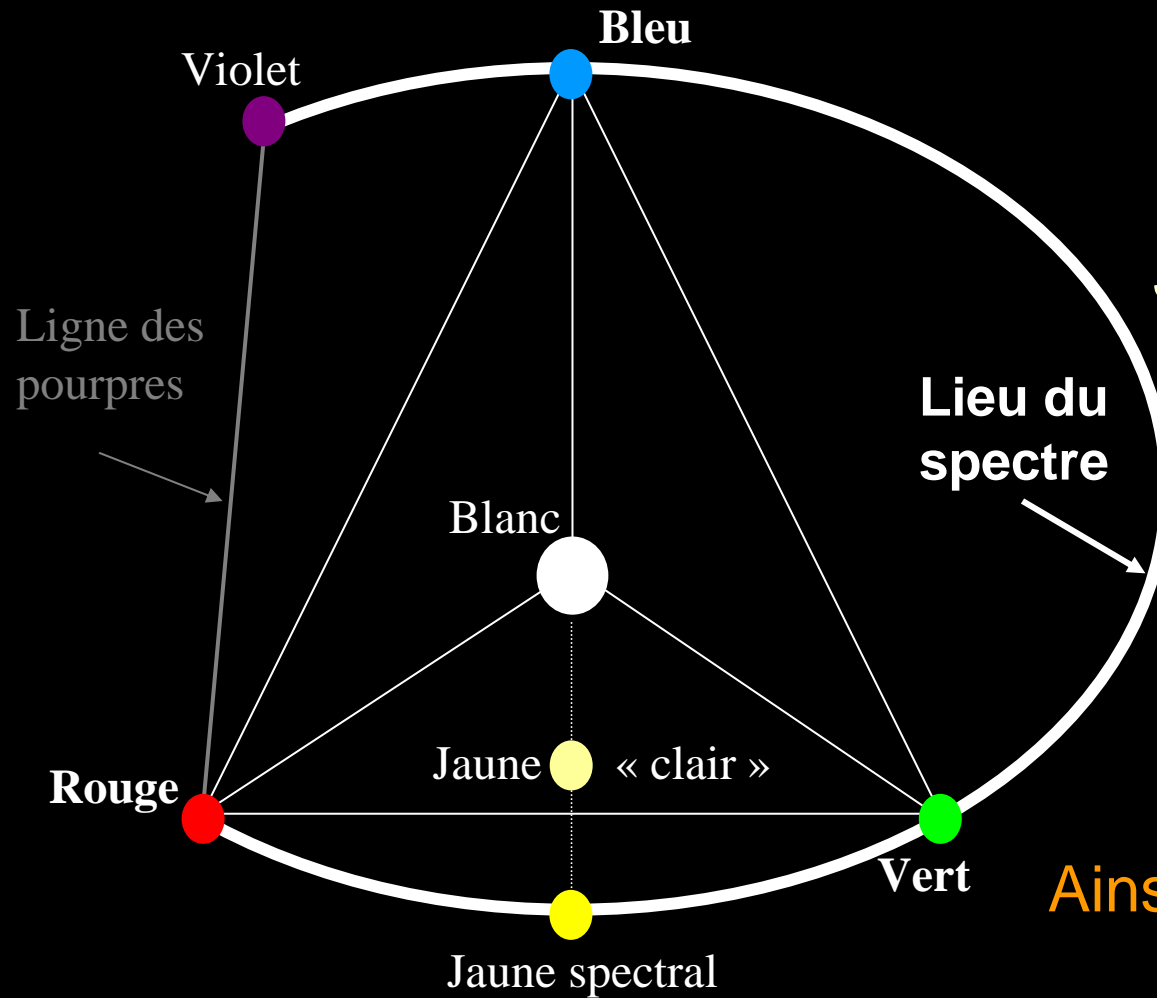


Pour obtenir une **couleur spectrale**  $L_\lambda$ , il faut retrancher du blanc ( $L_w$ ) à un mélange trichrome. Le lieu géométrique des couleurs spectrales est donc extérieur au triangle, tangent à ses 3 sommets (comparer à la même couleur désaturée, jaune « clair » ci-après)



# Le système trichrom(atique) ou RVB

## 1- Les couleurs spectrales



JC = mélange trichrome

$$JC = r.R + v.V + b.B$$

Ici,  $r = v$  et  $b \ll r \& v$

Mais aussi

JC = tonalité désaturée

$$JC = j.JS + w.W$$

Ainsi, pour le jaune spectral

$$JS = JC/j - (w/j).W$$

# Les différentes couleurs perçues

## 2- La ligne des pourpres

Les pourpres sont formés par le mélange (additif) des  $\lambda$  extrêmes du spectre visible (violet et rouge).

Selon les proportions respectives de violet et de rouge, on compte environ 100 nuances colorées, que l'on ne peut caractériser autrement que par la  $\lambda$  de leur complémentaire

Le facteur de pureté ne peut donc qu'être  $p = 1, \forall$  pourpre



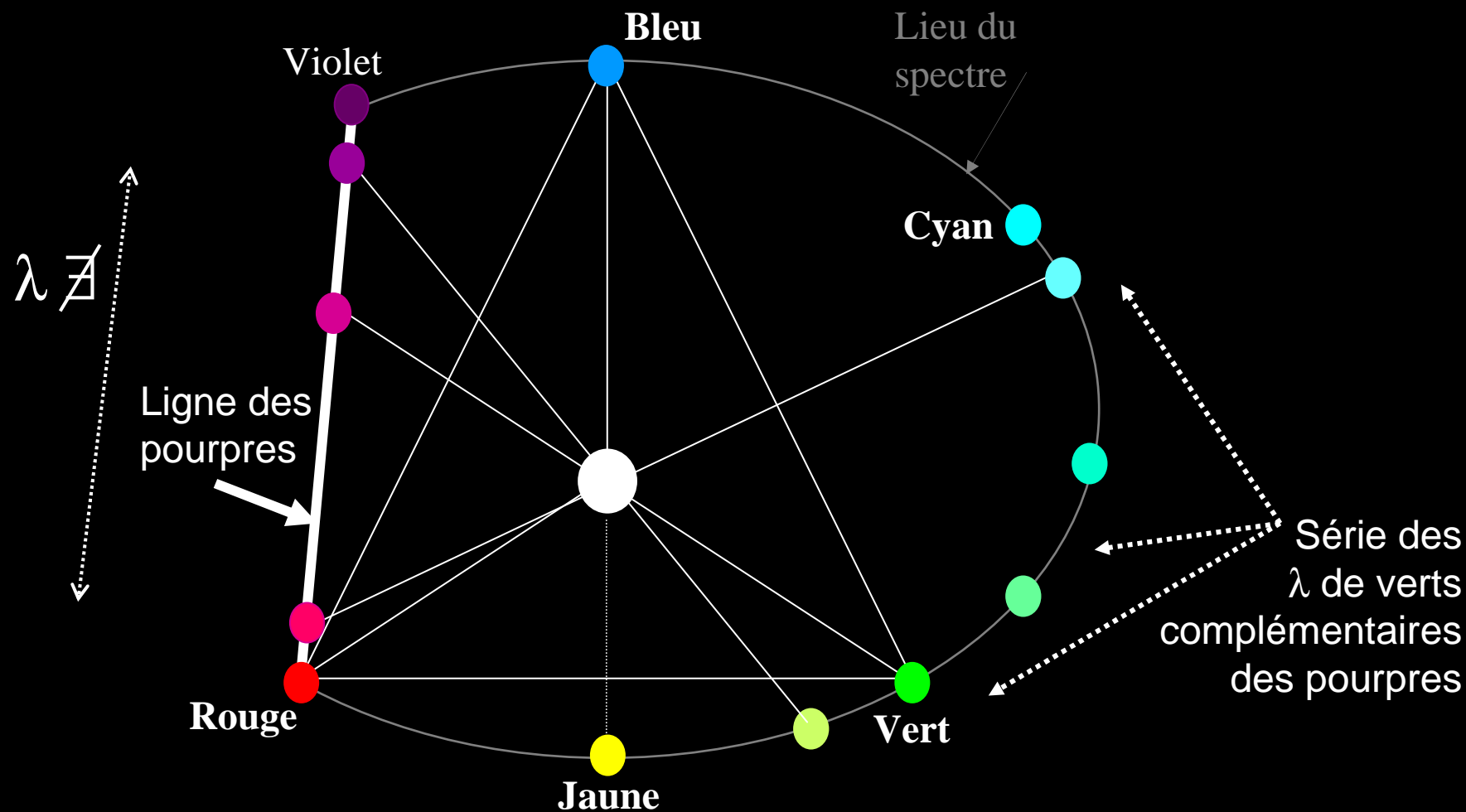
The diagram illustrates the additive mixture of red and violet to form magenta. It consists of three rectangular color swatches arranged horizontally. The first swatch on the left is magenta. To its right is an equals sign, followed by a percentage symbol and the letter 'R' with a superscripted asterisk (%<sub>R</sub>\*), then a red swatch. To the right of the red swatch is a plus sign, followed by a percentage symbol and the letter 'V' with a superscripted asterisk (%<sub>V</sub>\*), and finally a violet swatch.

$$\text{Magenta} = \%_R * \text{Rouge} + \%_V * \text{Violet}$$

Ces couleurs n'existent pas en tant que REM... ce ne sont que des impressions colorées construites par le cerveau humain

# Le système trichrom(atique) ou RVB

## 2- La ligne des pourpres



# Les différentes couleurs perçues

## 3- Les différents blancs

Les blancs thermiques : induits par les spectres d'émission continue (étoiles, lampes à incandescence). La température d'émission génère une  $\lambda_{\max}$  (jaune-bleu pour le Soleil  $\sim 5500^\circ\text{K}$  ou jaune rougeâtre pour une ampoule au tungstène  $\sim 2700^\circ\text{K}$ ), ce qui confère à ces blancs une dominante colorée, ignorée par notre cerveau.

Les blancs trichromes : le mélange d'un choix judicieux de primaires donne une impression de blanc selon :

$$L'_w = L'_R + L'_V + L'_B$$

Les blancs de complémentarité : addition de 2 couleurs spectrales de  $\lambda$  moyennement éloignées dans le spectre, dites complémentaires :  $L_w = L_\lambda + L_{\lambda'}$

par ex      bleu 485 nm et jaune 586,6 nm

verts et pourpres, cyan et rouge, vert-jaune et violet ...

# Les différentes couleurs perçues

## 4- Les couleurs désaturées

Elles fournissent les 1400 nuances restantes :

1- L'addition de 2  $\lambda$  peu éloignées dans le spectre visible produit la même sensation (teinte perçue) que celle d'une  $\lambda$  intermédiaire désaturée :

$$L = L_{\lambda_1} + L_{\lambda_2} = L_{\lambda} + L_w \quad \text{avec} \quad p = L_{\lambda} / L < 1$$

vert + rouge = jaune délavé    ou    jaune + bleu = vert délavé

2- Selon la teinte de départ, le nombre d'échelons de saturation possibles varie entre la couleur pure et le blanc. Il est minimum pour le jaune et augmente aux extrémités du spectre.

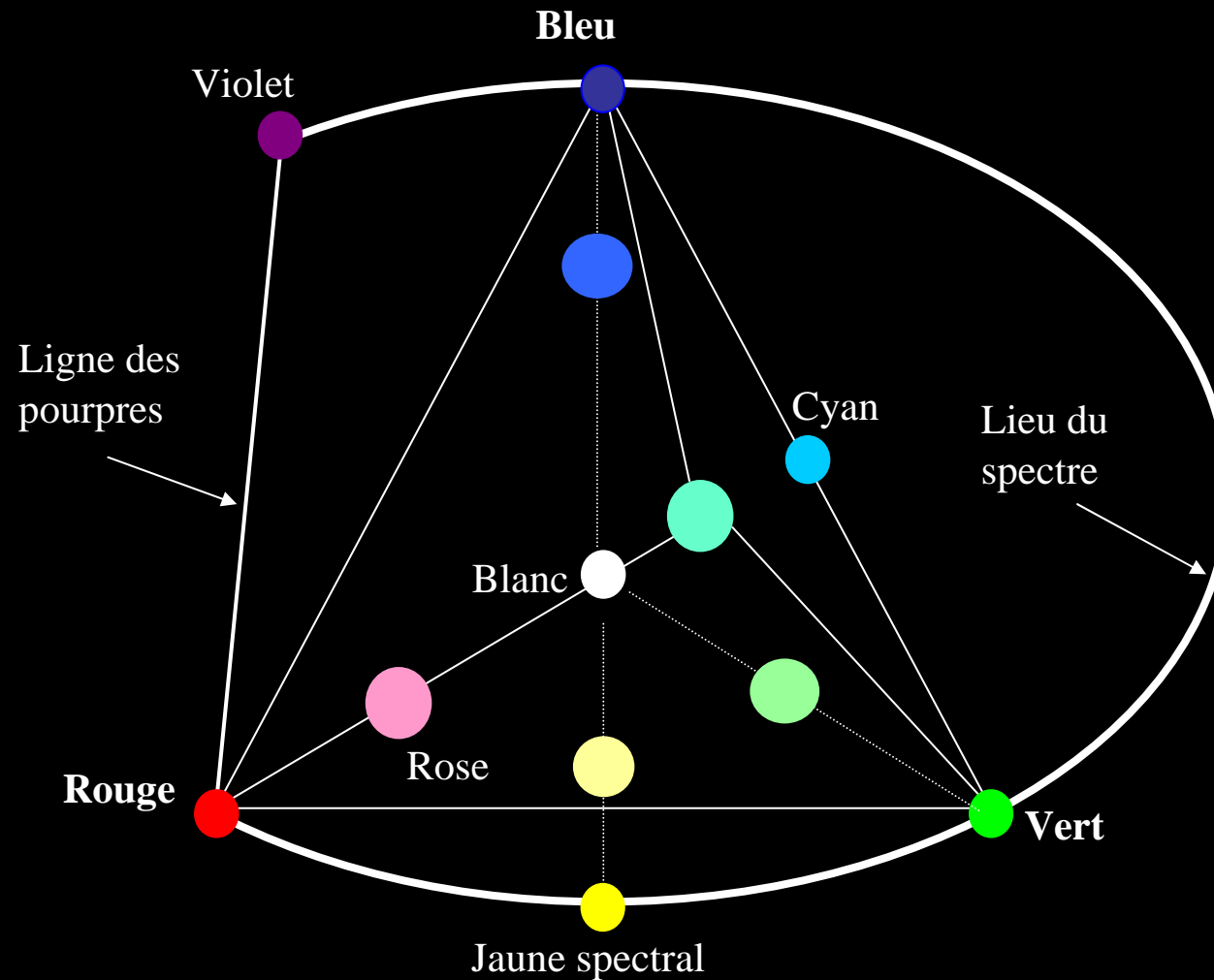
3- Tout mélange trichrome ne donnant pas du blanc produit le même effet :

$$L = L_R + L_V + L_B = L_{\lambda} + L_w, \quad p = L_{\lambda} / L < 1$$

4- Les autres tonalités décrites dans le langage courant (marron, vert-olive, gris, etc...) ne sont que des teintes "rabattues" c'est-à-dire des tonalités appartenant aux gammes précédemment décrites, mais avec une luminance réduite par rapport à notre environnement visuel.

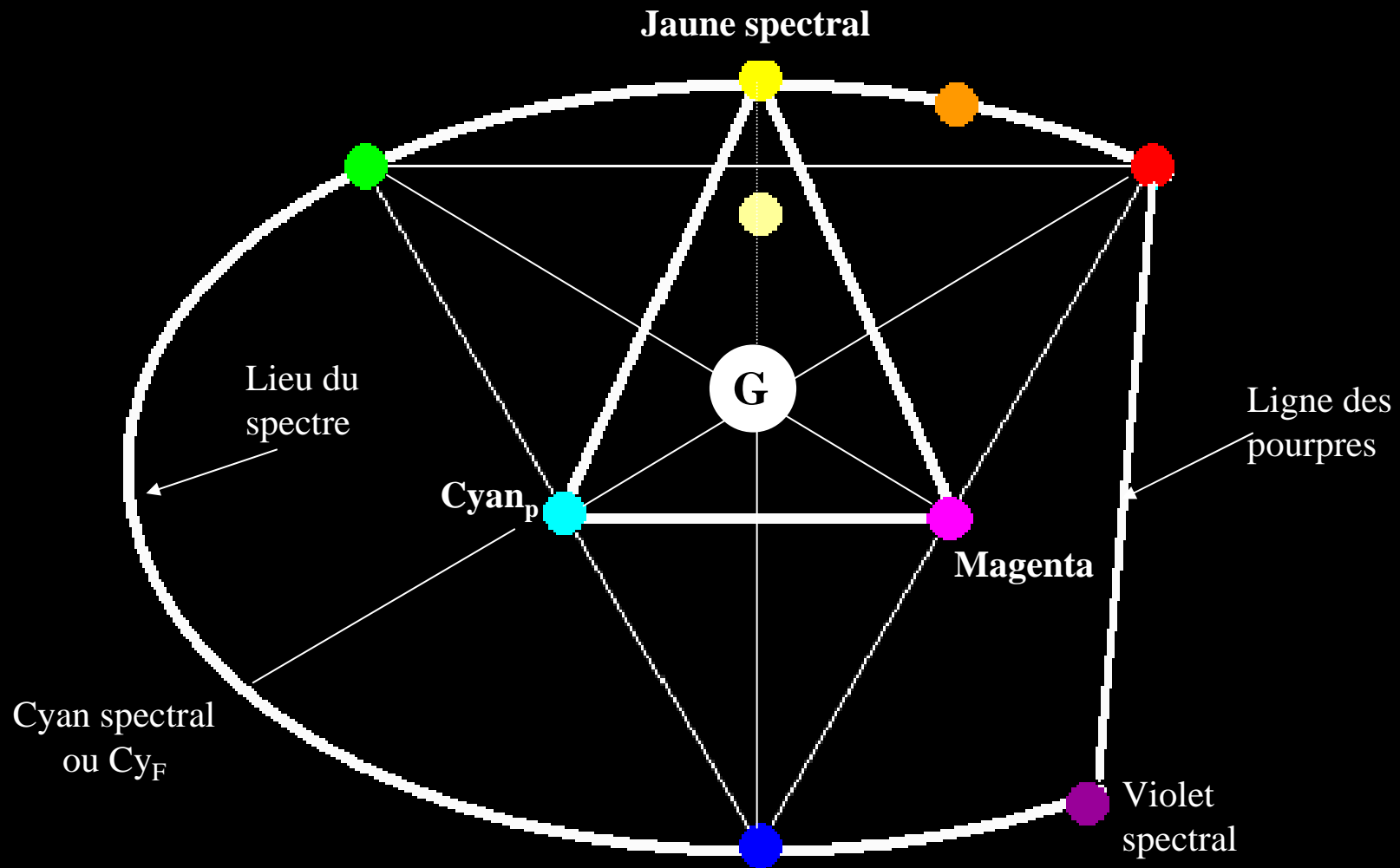
# Le système trichrom(atique) ou RVB

## 4- Les couleurs désaturées



# Le système trichrome des peintres

## Soustraction du pigment coloré au blanc



# LES DYSCHROMATOPSIES

## Anomalies de la vision des couleurs

L'Homme "normal" voit les couleurs grâce à 3 types de cônes différents

Les Dyschromatopsies sont assez fréquentes (8% population) mais peu gênantes

Leur diagnostic est souvent tardif, mais il n'existe pas de traitement ou de correction

### Les trichromatopsies anormales :

Le sujet perçoit bien les 3 couleurs primaires, mais en proportion  $\neq$  du sujet normal.

Dépistage : reproduire le jaune Na (589 nm) en mélangeant du rouge et du vert :

les protanormaux utilisent trop de rouge (% normal)

les deutéranormaux utilisent trop de vert

### Les Dichromatopsies :

Une des primaires n'est pas perçue  $\Rightarrow$  vision divariante ; une des 3 catégories de cônes est absente.

Les protanopes ne perçoivent pas le rouge : *c'est le daltonisme vrai ;*

Les deutéranopes ne perçoivent pas le vert : *c'est le type Nagel ;*

Les tritanopes ne perçoivent pas le bleu : *c'est exceptionnel*

### Les monochromatopsies :

Les sujets, dits achromates, n'ont *aucune vision colorée, univariants*



# LA COULEUR DES OBJETS (1)

Les objets éclairés sont des sources secondaires de lumière diffusée :

- 1- la quantité de photons diffusés détermine la luminosité de l'objet, sa luminance
- 2- la qualité de cette diffusion (sélectivité en  $\lambda$ ) en fixe la couleur.

Ces 2 aspects sont "facilement" prévisibles si l'on connaît le coefficient de réflexion diffuse  $\rho$  de l'objet (il augmente avec le pouvoir diffusant de l'objet) ;  $\rho$  est défini comme le rapport de la radiance de l'objet à son éclairement énergétique :

$$\rho = R / E$$

# LA COULEUR DES OBJETS (2)

Pour les corps "non sélectifs"

$\rho$  est indépendant de  $\lambda$ .

$\rho$  varie de 0,85 pour la magnésie (MgO) à 0,01 pour le velours noir.

Le corps est lumineux (blanc en lumière blanche ou de la couleur spectrale en lumière mono- $\lambda$ ) si  $\rho > 0,60$

Le corps est sombre (noir) pour de faibles valeurs de  $\rho$  (de l'ordre de 0,05)

Le corps est gris plus ou moins accentué pour des valeurs intermédiaires de  $\rho$ .

# LA COULEUR DES OBJETS (3)

Pour les corps "sélectifs"

$\rho$  dépend de  $\lambda$  selon une courbe de variation spectrale qui caractérise le corps diffusant.

La couleur du corps est déterminée par la portion diffusée du spectre, sa luminosité par la valeur de  $\rho$  dans cette portion spectrale.

Exemple : objet très sélectif absorbant beaucoup de vert et de bleu ( $\rho_{\text{vert}} = \rho_{\text{bleu}} = 0,2$ ). Selon qu'il diffuse plus ou moins de rouge ( $\rho_{\text{rouge}} = ?$ ) et qu'il est éclairé par un mélange RVB blanc ou coloré, voire en lumière mono- $\lambda$ , c'est le  $\rho(\lambda)$  correspondant qui déterminera sa couleur et sa luminosité.

# LA COULEUR DES OBJETS (4)

Exemple pour les corps "sélectifs"

$$\rho_{\text{vert}} = \rho_{\text{bleu}} = 0,2$$

éclairé en blanc

éclairé en  
rouge

éclairé en  
bleu

$$\rho_{\text{rouge}} = 0,9$$

rose foncé  
lumineux

rouge  
lumineux

bleu  
sombre

$$\rho_{\text{rouge}} = 0,5$$

rose foncé +  
sombre

rouge

bleu  
sombre

$$\rho_{\text{rouge}} = 0,2$$

gris-blanc  
sombre

rouge  
sombre

bleu  
sombre

$$\rho_{\text{rouge}} = 0,1$$

gris-jaune  
sombre

gris-rouge

bleu  
sombre

# LA COULEUR DES OBJETS (5)

## Remarques

### Bien distinguer :

le *blanc "physique d'un objet"*, qui indique qu'il diffuse de façon non sélective,

du *blanc "impression visuelle"*, sensation beaucoup plus lumineuse que l'entourage mais non colorée.

$R = \rho \cdot E = \pi \cdot B$ , si l'émission secondaire obéit à la loi de Lambert (isotropie du milieu de propagation), d'où

$$B = \rho \cdot E / \pi$$

Il est ainsi possible de déterminer la "brillance énergétique" d'une source secondaire ...

L'*albédo* des astronomes (planétologues) est le pouvoir diffusant d'un corps céleste (une planète, un astéroïde, un satellite, ...) dans le système solaire ; c'est une forme de coefficient de réflexion diffuse d'une planète vis à vis de la lumière solaire. Il vaut 0.70 pour Vénus, 0.55 pour Neptune, 0.45 pour La Terre et 0.07 pour la Lune.



*The End ...*