

Certificat NEUROSCIENCES

BIOPHYSIQUE DE LA VISION

Vision de la quantité de lumière (sensibilité)

Vision de la qualité chromatique (couleurs)

Professeur M. ZANCA

Version Avril 2006

LA VISION

GENERALITES SUR LA BIOPHYSIQUE SENSORIELLE	3
LA VISION.....	4
A- LE MESSAGE PHYSIQUE	4
A.I- Lumière visible.....	4
A.I.1- Propriétés physiques de la lumière	4
A.I.2- Généralités sur les sources d'émission de REM	4
A.I.3- Les sources primaires	5
A.I.4- Les sources secondaires.....	5
A.II- Grandeurs radiométriques	6
A.II.1- Flux énergétique.....	6
A.II.2- Intensité énergétique	7
A.II.3- Brillance énergétique	7
A.II.4- Radiance énergétique	7
A.II.5- Eclairement énergétique.....	7
B- LE MESSAGE SENSORIEL ET LES GRANDEURS PHOTOMETRIQUES	7
B.I- La trivariance visuelle.....	8
B.I.1- Le système monochromatique de TV	8
B.I.2- Le système trichrome de TV ou RVB.....	8
B.II- Approche d'une mesure de la Luminance.....	8
B.II.1- Luminance (perçue) et brillance énergétique (source) :	8
B.II.2- Sensibilité de l'œil à la longueur d'onde :	9
B.II.3- Mesure de la Luminance :	10
B.II.4- Grandeurs et unités photométriques	11
B.II.5- Adaptation à l'obscurité	11
C- LES CAPTEURS VISUELS :.....	14
C.I- Les dioptries, les systèmes centrés et les lentilles.....	14
C.II- Dioptrique oculaire.....	14
C.III- Troubles dioptriques de la vision	14
C.IV- Le transducteur	14
C.VI- Vision de couleurs	14
C.VI.1- Généralités	14
C.VI.2- La Trivariance Visuelle (TV).....	15
C.VI.3- Les lois de GRASSMAN.....	16
C.VI.4- Les différentes couleurs perçues.....	16
C.VI.5- Dyschromatopsies (Ds).....	19
C.VI.6- Couleur des objets (sources secondaires) :	19

GENERALITES SUR LA BIOPHYSIQUE SENSORIELLE

La biophysique sensorielle se préoccupe de la perception des signaux extérieurs. Un signal est une forme très spécialisée d'énergie qui porte un message physique précis. Un organisme vivant perçoit ces signaux grâce à une véritable chaîne de détection, dont la structure est équivalente pour la vision, l'audition, l'odorat, le goût, l'équilibre vestibulaire, la sensibilité,

Dans les cas de la vision et de l'audition, la chaîne peut être décrite comme suit :

Chaîne sensorielle	Vision	Audition	Exploration
Signal (message physique)	REM visible (400 < 1 < 750 nm)	vibration sonore	Physique
Capture du signal	globe oculaire	oreille externe et moyenne	Biophysique Electrophysiologie
Transduction (*)	rétine	cochlée	Biochimie
Transmission (**)	voies optiques	voies auditives	Pathologies
Analyse et interprétation (***)	aires 17, 18 & 19 cortex occipital	aires 41 & 42 cortex temporal	Imagerie fonctionnelle (TEP, TEM, IRMf)

(*) le transducteur transforme le signal physique en signal biologique nerveux (suite de potentiels d'action, PA)

(**) les PA sont souvent "pré traités" le long des voies de transmission vers les centres nerveux

(***) l'analyse est effectuée dans les centres nerveux ; elle permet l'interprétation du signal perçu.

Les voies sensibles et sensorielles comportent systématiquement un organe récepteur et trois neurones, dont le premier est direct, le deuxième croise. Il en est ainsi par exemple pour la sensibilité cutanée ou la vision :

	Voie de la sensibilité cutanée	Voies optiques
Organes récepteurs	corpuscule de Pacini	cônes et bâtonnets
1^{er} neurone	vers moelle via ganglion racine post	cellules bipolaires
2^{ème} neurone	nyx Goll & Burdach -> Thalamus controlatéral	cellules ganglionnaires -> corps géniculé ext controlat
3^{ème} neurone	Thalamus -> cortex pariétal (circonvolution par. ascendante)	corps géniculé -> cortex occipital

Dans ce cours de biophysique sensorielle, nous aborderons principalement le recueil du signal par la définition (objective) du message physique et la description (subjective) des qualités physiologiques du message sensoriel associé. Après l'étude des capteurs et de leur propriétés et pathologies, la transduction sera abordée par l'analyse des mécanismes de codage (transduction + transmission) de l'information captée en vue de sa reconnaissance par les centres nerveux.

L'explosion récente des techniques d'imagerie fonctionnelle permet, à travers la visualisation de territoires cérébraux activés par des stimulations sensorielles, d'entrevoir une certaine compréhension des mécanismes d'analyse et d'interprétation centrales.

LA VISION

A- LE MESSAGE PHYSIQUE

A.1- Lumière visible

A.1.1- Propriétés physiques de la lumière

- Fréquences, propagation, vitesse (indices), réfraction, réflexion, ... sont des grandeurs objectives : voir TD
- Le spectre visible est perçu sous forme de couleurs, impressions subjectives séparant le spectre visible en familles de longueurs d'ondes :

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

Ces 6 nuances forment les couleurs spectrales, dont évidemment les frontières sont floues et arbitraires, les transitions étant graduelles et continues.

- En outre, l'œil est capable de percevoir des nuances colorées "non spectrales", les pourpres, constitués de mélanges des deux extrêmes (violet et rouge) en proportions variables.

A.1.2- Généralités sur les sources d'émission de REM

Soit une source étendue de surface σ , émettant dans une direction D° donnée, vers un objet éclairé de section S , dans un angle solide Ω (figure 1). D° fait un angle α avec la normale (nS) à la section de la source, et un angle θ avec celle (nO) de l'objet.

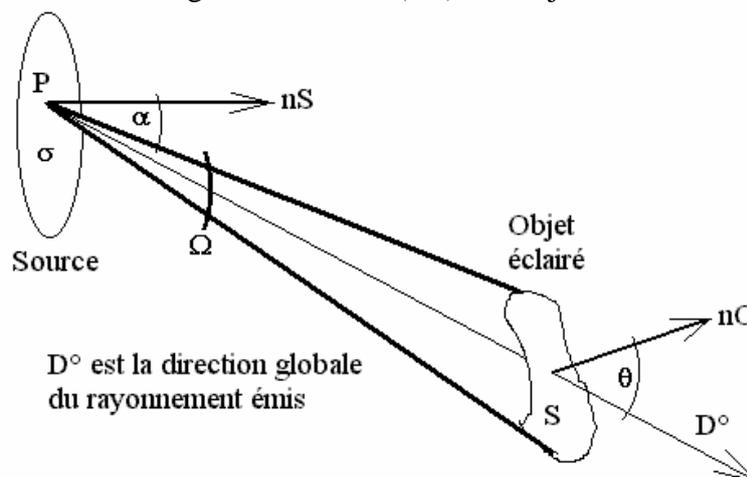


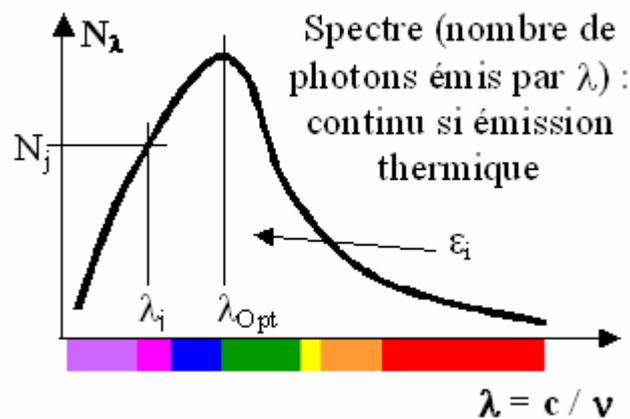
figure 1

Chaque point P émet de façon radiale et éclaire l'objet sous l'angle solide W. La source est ainsi constituée d'un ensemble de sources ponctuelles et loin d'elles, seule est perçue une émission surfacique (aire σ) globale.

On distingue des sources primaires, capable d'émission autonome (thermique ou quantique) de lumière, et les sources secondaires (objets éclairés renvoyant une partie de la lumière reçue).

A.1.3- Les sources primaires

- L'**émission thermique** est liée à l'agitation thermique des électrons (étoiles, lampes à incandescence). Son **spectre** (énergie émise en fonction de la fréquence) est **continu** et lié à la température de la source : plus le corps est chaud, plus le spectre est intense et se déplace vers les courtes longueurs d'onde.



La source est dite "radiateur intégral" si elle émet tous les rayonnements produits, et "corps noir" si elle absorbe tous ceux reçus (pas de rayonnements réfléchis) ; dans ce cas, l'énergie émise est décrite par la loi de Stefan, $\epsilon = \sigma T^4$ (où $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) et sa répartition spectrale suit la loi de Planck :

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

En pratique, un corps noir est un idéal, et toute source réelle se caractérise par un coefficient de réflexion diffuse non nul. Cependant, son émission reste comparable à celle du corps noir ; on peut donc la caractériser par sa "**température de couleur**" ($T_c \neq T$), correspondant à la température que devrait avoir un corps noir qui produirait un spectre **visible idéal** superposable au mieux au spectre réel [$T_c \approx 6000^\circ\text{K}$ en surface pour le soleil (dominante jaune, $\lambda = 555 \text{ nm}$) et un temps clair et ensoleillé, et va de $\approx 6800^\circ\text{K}$ (ciel couvert) à près de $50\,000^\circ\text{K}$ pour un ciel bleu (diffusion atmosphérique en λ^{-4}).

- L'**émission quantique** est liée aux transitions électroniques atomiques et moléculaires. Elle se caractérise par un spectre de raies et se superpose souvent à l'émission thermique (vers luisant, tubes fluorescents, étoiles).

A.1.4- Les sources secondaires

Les photons éclairant un objet n'ont que 2 destinées possibles : être absorbés par l'objet (probabilité p_a) ou être diffusés/réfléchis (probabilité p_d) ; ainsi, $p_a + p_d = 1$.

La distribution de p_a (donc p_d) pour tout $\lambda \in [400 \text{ nm}, 800 \text{ nm}]$ caractérise l'objet éclairé qui devient ainsi source secondaire de lumière diffusée.

La quantité de photons diffusés et leur composition spectrale dépendent des propriétés optiques de l'objet [par $p_a(\lambda)$] et de celles de la lumière incidente [composition spectrale et "degré" d'éclairage de l'objet].

Nous verrons plus loin que l'on peut caractériser les objets "sources" par leur couleur et leur "brillance" ...

A.II- Grandeurs radiométriques

Elles permettent la *description objective de la quantité de signal physique*. Elles rendent compte de l'énergie lumineuse émise par la source, transportée par les photons dans le faisceau lumineux et reçue sur un objet (écran, détecteur, ...).

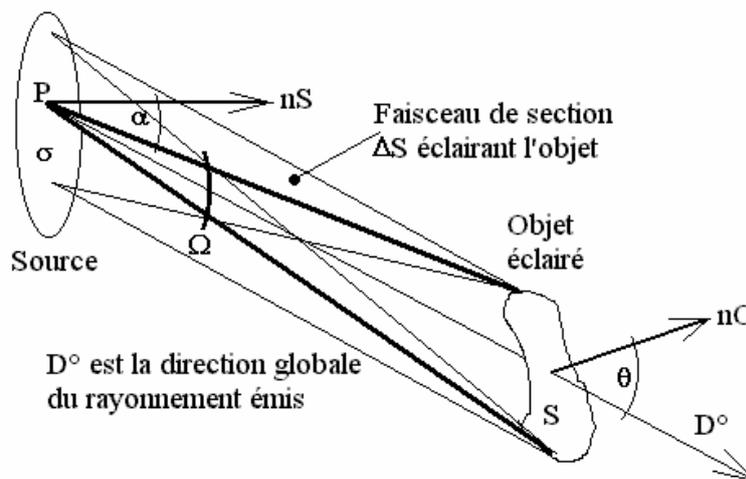


figure 2

Le faisceau éclairant l'objet est alimenté par les différents points P_i de la source, chacun émettant $N_{i\lambda}$ photons de longueur d'onde λ (fréquence ν) avec une énergie lumineuse élémentaire :

$$\varepsilon_i = \int_{\lambda} N_{i\lambda} \cdot h \frac{c}{\lambda} \cdot d\lambda = \int_{\nu} \varphi(\nu) \cdot d\nu$$

L'énergie totale transportée par le faisceau est la contribution de toutes les sources ponctuelles dans σ , d'où

$$E_n = \sum_i \varepsilon_i.$$

A.II.1- Flux énergétique

Le **flux énergétique** Φ de chaque source ponctuelle est le débit d'énergie transportée dans Ω à travers ΔS , la section du faisceau éclairant l'objet (notons que $\Delta S = \sigma \cdot \cos\alpha = S \cdot \cos\theta$). Ainsi, dans ΔS ,

$$\Phi_i = d\varepsilon_i / dt \quad (\text{Watts}).$$

Ω est l'angle solide sous lequel est vu l'objet d'un point de la source :

$$\Omega = S \cdot \cos\theta / r^2$$

Ω est aussi la portion d'espace où chaque point de la source doit émettre pour éclairer l'objet.

Le **flux global** Φ vient de la superposition de toutes les émissions ponctuelles de la source,

$$\Phi = dE / dt.$$

A.II.2- Intensité énergétique

L'intensité énergétique J d'une source ponctuelle P_i émise dans la direction D° de l'objet est alors donnée par le flux dans l'angle solide Ω :

$$J_i = d\Phi_i / d\Omega = d\varepsilon_i / dt / d\Omega \quad (\text{W.sd}^{-1})$$

En pratique, une mesure physique ne peut apprécier que *l'intensité énergétique globale de la source étendue*

$$J = \sum_i J_i = d\Phi / d\Omega = dE / dt / d\Omega$$

A.II.3- Brillance énergétique

Pour une source étendue, on définit la **brillance (ou luminance) énergétique B de la source dans la seule direction D° de l'objet** comme l'intensité énergétique globale par unité de surface de source:

$$B_L = dJ / (d\sigma \cdot \cos\alpha) = dE / dt / d\Omega / (d\sigma \cdot \cos\alpha) \quad (\text{W.m}^{-2}.\text{sd}^{-1})$$

Elle caractérise l'émission d'une source étendue dans une direction donnée.

A.II.4- Radiance énergétique

Pour une source étendue, on définit la **radiance (ou émittance) énergétique R de la source**, comme le flux total émis par toute la source, dans toutes les directions, par unité de surface de source :

$$R_E = d\Phi / d\sigma = dE / dt / d\sigma \quad (\text{W.m}^{-2})$$

Si le milieu de propagation est isotrope (pas de direction sélective, càd brillance B_L identique dans toutes les directions), R_E obéit à la loi de Lambert :

$$R_E = \pi \cdot B_L$$

A.II.5- Eclairement énergétique

L'éclairement énergétique E de l'objet est le flux global reçu par section d'objet :

$$E = d\Phi / dS = dE / dt / dS \quad (\text{W.m}^{-2})$$

Il existe une relation simple entre E et J : $E = J \cdot \cos\theta / r^2$

En effet $J = d\Phi / d\Omega = d\Phi \cdot r^2 / (dS \cdot \cos\theta) = E \cdot r^2 / \cos\theta$

C'est la loi de l'inverse carré de la distance, liée à ce que le faisceau éclairant S est conique.

Remarque : bien distinguer **éclairement** (flux partiel interceptant la section de l'objet) et **radiance** (flux surfacique total émis par la source).

En résumé, en termes globaux

Flux énergétique	$\Phi = dE/dt$	C'est une puissance, en watts
Intensité énergétique	$J = dE/dt/d\Omega$	$\text{J.s}^{-1}.\text{sd}^{-1}$
Brillance énergétique	$B = dE/dt/d\Omega / (d\sigma \cdot \cos\alpha)$	Ou encore luminance
Radiance énergétique	$R_E = d\Phi / d\sigma = W/\sigma = \pi \cdot B_L$	Ou encore émittance
Eclairement énergétique	$E = d\Phi/dS$	$\text{J.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ d'objet irradié

B- LE MESSAGE SENSORIEL ET LES GRANDEURS PHOTOMETRIQUES

Le message sensoriel est ce que l'œil biologique perçoit et interprète du message physique.
L'approche est beaucoup plus subjective. Les grandeurs photométriques prétendent à une *description objective de la perception du message sensoriel lumineux* par notre cerveau, alors même que la sensation lumineuse et l'interprétation colorée sont des phénomènes subjectifs.

C'est le constat expérimental de trivariance visuelle et la détermination de courbes d'efficacité qui ont permis d'objectiver la mesure de ces sensations.

B.I- La trivariance visuelle

Le message sensoriel est une sensation lumineuse dont l'expérience montre qu'elle peut être totalement caractérisée par 3 variables indépendantes : *on parle de trivariance visuelle (TV)*.

B.I.1- Le système monochromatique de TV

Dans ce système, seule la λ dominante suffit, bien que ces variables rendent compte de 3 qualités physiologiques. Ces qualités sont perçues comme immédiates et traduisent l'intensité et la couleur :

- **la luminance L** , intensité perçue, indépendamment de la couleur ; liée à la quantité et l'énergie des photons, c'est une grandeur mesurable ;
- **la tonalité**, traduisant la *teinte perçue* ; non mesurable, cette impression colorée est repérée par rapport à une λ connue produisant la même sensation ;
- **la saturation**, traduisant le % de *lumière blanche "délavant" la teinte* : un bleu foncé est plus saturé qu'un bleu clair.

Tonalité et saturation sont indissociables, et caractérisent la perception de la couleur (qualité chromatique). Ainsi, dans ce système, toute sensation lumineuse se définit comme la superposition de 2 quantités, l'une de lumière monochromatique L_λ (intensité de la teinte) et l'autre de blanc L_w :

$$L = L_\lambda + L_w$$

La saturation se mesure alors par un rapport, p , appelé **facteur de pureté**, qui vaut 0 pour le blanc, et 1 pour une couleur spectrale pure (non délavée) :

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

B.I.2- Le système trichrome de TV ou RVB

Il utilise des variables moins physiologiques mais physiquement mesurables. *Toute sensation lumineuse peut être reproduite par la superposition, en mélange convenable, de 3 teintes "judicieusement" choisies et appelées primaires*, ici le Rouge, le Vert et le Bleu. Là encore, la première sensation, intuitive, est celle d'intensité lumineuse, qui nous fait qualifier la lumière de plus ou moins intense. Ainsi, **l'intensité d'une sensation lumineuse quelconque** sera-t-elle mesurée par la même grandeur, au départ subjective, la luminance (L), qu'il est ici possible de mesurer selon :

$$L = L_R + L_V + L_B$$

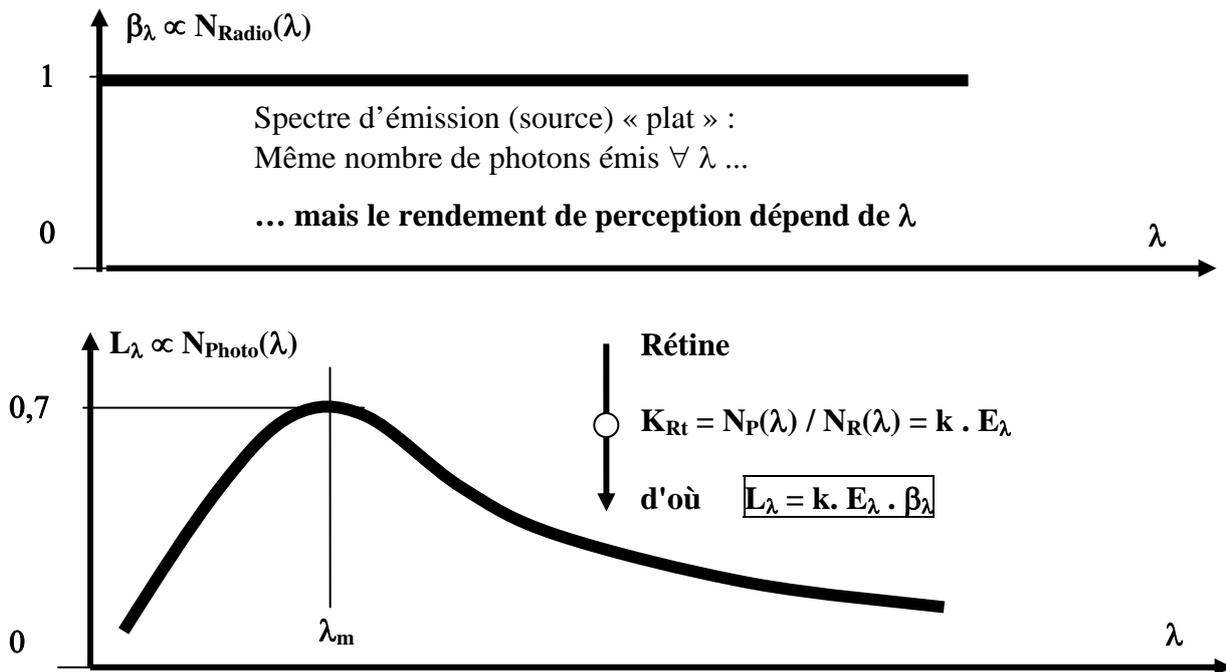
B.II- Approche d'une mesure de la Luminance

B.II.1- Luminance (perçue) et brillance énergétique (source) :

- La luminance perçue L est la sensation qui nous permet de traduire l'intensité perçue, c'est-à-dire l'éclairement énergétique de la rétine (photorécepteurs), directement lié à la brillance énergétique B de la source. On devrait donc pouvoir appréhender L au moyen de B , grâce à une relation de type $L = K_{Rt} \cdot B$, où K_{Rt} est un simple coefficient de proportionnalité.
- Pour comparer 2 luminances, il faut les alterner sur la rétine à une fréquence de 6 à 10 Hz, ce qui provoque un papillotement qui disparaît à égalité. Une fréquence trop élevée ne permet

pas de distinguer l'alternance des luminances (fusion), tandis qu'une fréquence trop basse maintient les couleurs séparées.

- Ainsi observe-t-on que, si 2 sources monochromatiques de même λ et même brillance énergétique produisent bien la même sensation lumineuse (à même diamètre pupillaire), ce n'est pas le cas lorsque ces sources ont des λ différentes : l'égalité des luminances de 2 sensations de couleur différente ne correspond plus à celle des brillances énergétiques, et l'on peut écrire: $\text{pour un } L \text{ identique, si } \lambda_1 \neq \lambda_2 \Leftrightarrow B_{\lambda_1} \neq B_{\lambda_2}$
- Imaginons alors une source (radiométrique) théorique de β_λ constante $\forall \lambda$: on observe que le rendement de la perception rétinienne varie avec λ



- Le rapport $K_{Rt} = N_P(\lambda)/N_R(\lambda)$ dépend de λ . Il est maximum pour λ_m , par ex. égal à 0,7 dans le cas de la figure ci-dessus. Pour toute autre λ différente de λ_m , ce rapport sera inférieur et l'on peut écrire : $K_{Rt} = N_P(\lambda) / N_R(\lambda) = k \cdot E_\lambda$ avec $E_\lambda = 1$ pour $\lambda = \lambda_m$ et $E_\lambda < 1 \forall \lambda \neq \lambda_m$
- On remarque que $k = N_P(\lambda_m) / N_R(\lambda_m) = K_{Rt}^{\max}$
- On appelle **efficacité lumineuse** d'une source à la longueur d'onde λ , le facteur E_λ qui varie avec λ . Ainsi $E_\lambda = K_{Rt} / k = [N_P(\lambda) / N_R(\lambda)] / [N_P(\lambda_m) / N_R(\lambda_m)] = L_\lambda / (K_{Rt}^{\max} \cdot B_\lambda)$.

B.II.2- Sensibilité de l'œil à la longueur d'onde :

Ainsi, la sensibilité de l'œil à la lumière dépend-elle de la longueur d'onde : l'oeil est totalement insensible aux IR et UV, et plus sensible au bleu qu'au rouge, avec un maximum dans le jaune ($\lambda_{md} = 555 \text{ nm}$) en vision diurne (indice d) et dans le vert ($\lambda_{mn} = 510 \text{ nm}$) en vision nocturne (indice n). L'efficacité lumineuse étant maximale pour λ_m , c'est à cette longueur d'onde qu'il faudra la brillance de source la plus faible (B_{λ_m}) pour produire une sensation lumineuse donnée L, toute autre $\lambda \neq \lambda_m$ nécessitant une brillance $B_\lambda > B_{\lambda_m}$ pour reproduire L.

Or $L_\lambda = k \cdot E_\lambda \cdot \beta_\lambda$ et $L_{\lambda_m} = k \cdot E_{\lambda_m} \cdot \beta_{\lambda_m}$
Ainsi, si $L_\lambda = L_{\lambda_m}$ alors $B_{\lambda_m} = E_{\lambda_m}/E_\lambda = V_\lambda \cdot B_\lambda$ avec $0 \leq V_\lambda \leq 1$

$V_\lambda = B_{\lambda_{\text{m}}} / B_\lambda$ est le *coefficient d'efficacité lumineuse*. Ses variations en fonction de λ représentent les *courbes d'efficacité lumineuse* ci-après. La variabilité biologique étant faible, elles sont données pour un œil moyen, celui de l'observateur de référence :

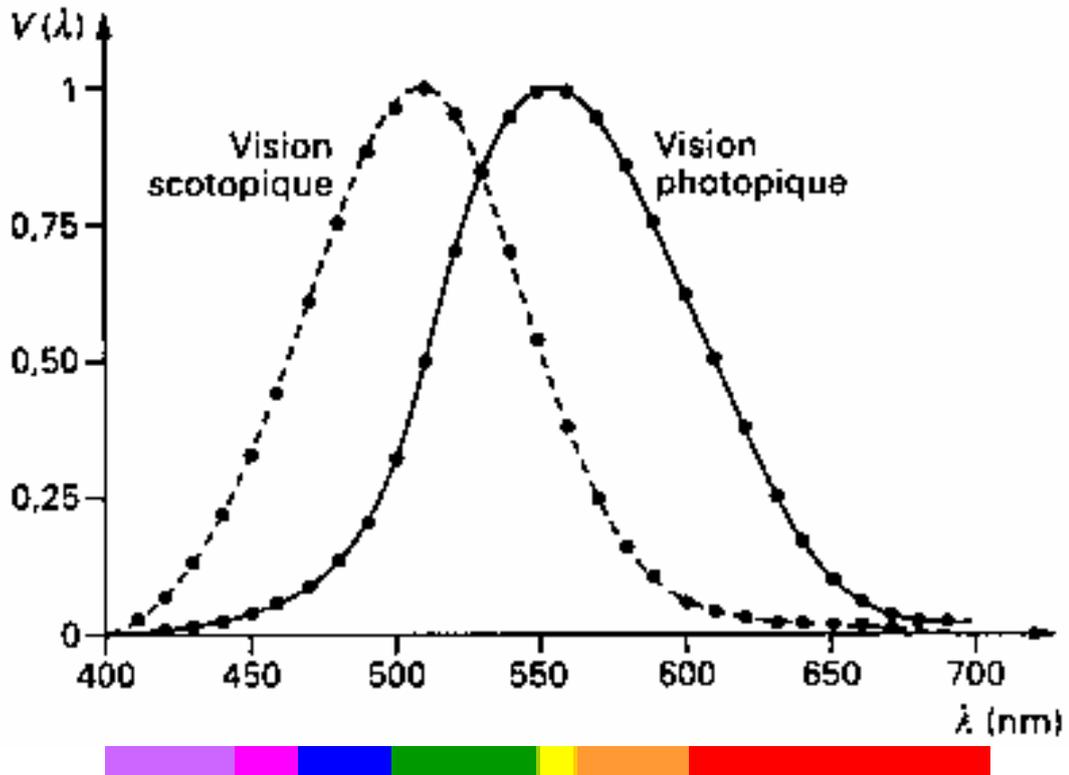


figure 3

Ces courbes trahissent l'existence de 2 types de photorécepteurs rétiniens, les cônes pour la vision diurne (photopique) et les bâtonnets pour la vision diurne (scotopique). Elles montrent en outre que les cônes sont sensibles au jaune (nous sommes nés sous l'étoile Soleil, qui est une étoile jaune) et les bâtonnets insensibles au rouge.

B.II.3- Mesure de la Luminance :

V_λ permet de définir, par convention par rapport à la courbe d'efficacité lumineuse photopique, la **luminance**, ou **intensité perçue** L_λ , d'une source colorée :

$$L_\lambda = k \cdot B_{\lambda_{\text{md}}} = k \cdot V_{\lambda d} \cdot B_\lambda \quad \text{avec } V_{\lambda d} = B_{\lambda_{\text{md}}} / B_\lambda$$

Pour les lumières complexes (source polychromatique), l'expérience montre que la **luminance globale vaut la somme des luminances** des composantes (loi d'Abney).

La luminance, qui traduit une sensation subjective, est ainsi physiquement mesurable par la brillance énergétique de la source, pour autant que l'on connaisse le maximum d'efficacité lumineuse diurne de l'œil.

- Corollaire : des luminances égales entre plusieurs λ impliquent :

$$\begin{aligned} V_{\lambda_{id}} \cdot B_{\lambda_i} &= \text{Cste}, & \text{ce que l'on peut écrire par exemple :} \\ L_{\lambda_i} &= L_{\lambda_j} & \Leftrightarrow V_{\lambda_{id}} \cdot B_{\lambda_i} = V_{\lambda_{jd}} \cdot B_{\lambda_j} \end{aligned}$$

- Remarque importante : attention, la **luminance** est l'**intensité perçue** par la rétine, non l'**intensité lumineuse du faisceau** ; elle correspond en fait à l'intensité lumineuse par unité de surface de source, ce qui représente bien une brillance ...

B.II.4- Grandeurs et unités photométriques

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

GRANDEURS RADIOMETRIQUES			GRANDEURS PHOTOMETRIQUES		
Flux énergétique	Φ	Watt	Flux lumineux	F	lumen
Intensité énergétiq	$J = d\Phi/d\Omega$	$W.sd^{-1}$	Intensité lumineuse	I	candela (cd)
Eclairemt énergtq	$E = d\Phi/dS$	$W.m^{-2}$	Eclairemt lumineux	E	$lumen.m^{-2} = lux$
Brillance énergtq	$B = dI/d\sigma/\cos\alpha$	$W.m^{-2}.sd^{-1}$	Luminance	L	$cd.m^{-2} = 10 nits$

- **L'intensité lumineuse I** du faisceau lumineux est directement reliée à la luminance de la source (cf. fig. 1) par la relation :

$$I = L \cdot \sigma \cdot \cos\alpha = \sum_{\lambda} (k \cdot V_{\lambda d} \cdot J_{\lambda}) \quad (\text{candela, cd})$$

Une candela (nouvelle bougie) mesure l'intensité lumineuse, dans une direction déterminée, (D°) d'une ouverture (source étendue) perpendiculaire à cette direction ($\sigma \cdot \cos\alpha$), ayant une aire de $1/60 \text{ cm}^2$ et rayonnant comme un corps noir à la température de solidification du platine (2028°K)

- **Le flux lumineux** dérive de l'intensité par :

$$F = I \cdot \Omega = \sum_{\lambda} (k \cdot V_{\lambda d} \cdot \Phi_{\lambda}) \quad (\text{lumen})$$

La connaissance du spectre du corps noir à 2028°K et la loi d'additivité des luminances permet de calculer k, qui vaut 663 unités photométriques, par exemple lumen par unité radiométrique, ici le watt

- **L'éclairement lumineux**, ou densité surfacique de flux capté par l'objet (surface S) est donné (cf. fig.1) par :

$$E = F / S = \sum_{\lambda} (k \cdot V_{\lambda d} \cdot E_{\lambda}) \quad (\text{lux})$$

On retrouve, puisque $\Omega = (S \cdot \cos\theta) / r^2$ que $E = I \cdot \cos\theta / r^2$ (loi de l'inverse carré de la ditance)

- **La luminance**, comme on l'a vu, mesure la brillance énergétique de la source perçue par l'œil de référence ; c'est la densité surfacique du flux d'émission (surface σ) :

$$L = I / (\sigma \cdot \cos\alpha) = \sum_{\lambda} (k \cdot V_{\lambda d} \cdot B_{\lambda}) \quad (1 \text{ cd}/\text{m}^2 = 10 \text{ nits})$$

ordre 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	1300
Disque solaire	$1,5 \cdot 10^9$

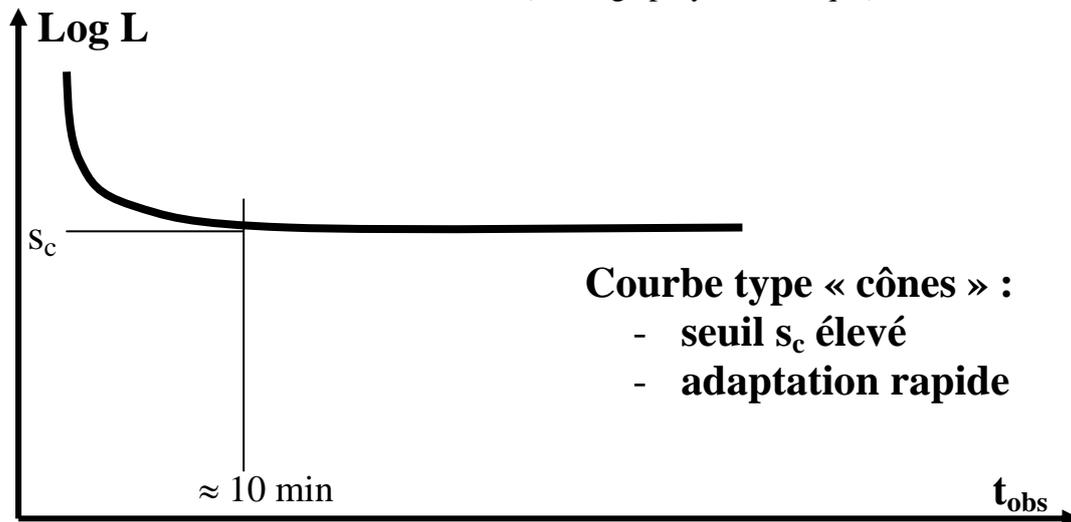
B.II.5- Adaptation à l'obscurité

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 :

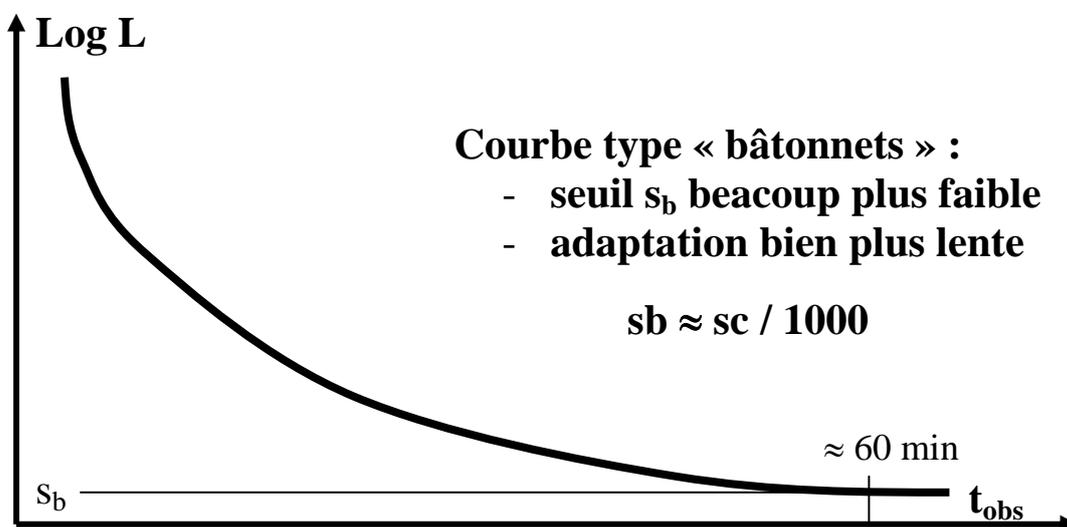
la vision nocturne, scotopique, due aux bâtonnets (insensibles au rouge) diffère de la vision diurne, photopique, due aux cônes.

On peut donc s'attendre à ce que le passage d'un fort éclairement à l'obscurité (éclairage (très) faible) nécessite un temps d'adaptation ± long selon le différentiel, ce que montre les courbes de HOECHT (« t_{obs} » est le temps passé dans l'obscurité et « L » la luminance d'une source éclairant la rétine (Rt) au seuil de détection) :

- (1) Source générant : - un éclairement Rt purement FOVEAL (cônes)
 - avec du blanc (mélange polychromatique)



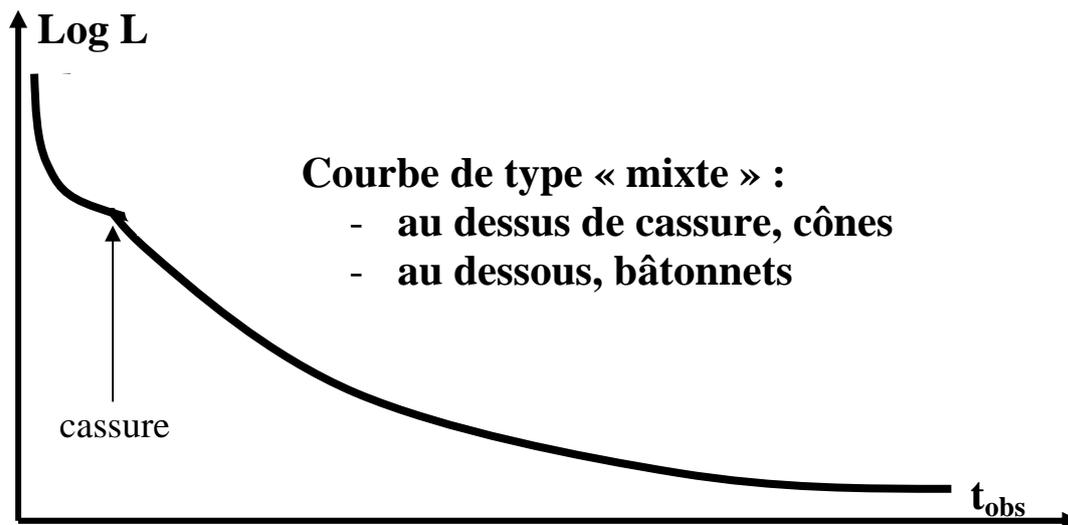
- (2) Source générant : - un éclairement Rt périphérique (bâtonnets)
 - avec du blanc (mélange polychromatique)



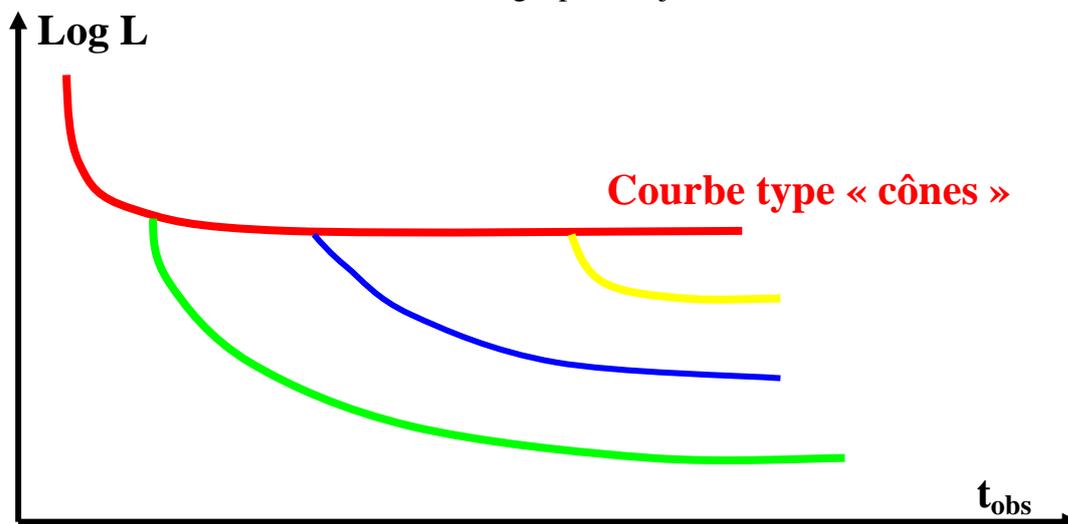
Les bâtonnets sont beaucoup plus sensibles que les cônes (un millier de fois plus) mais beaucoup plus lents à s'adapter (près de 60 min au lieu de 10)

- (3) Source générant : - un éclairement Rt fovéal et périphérique

- avec du blanc (mélange polychromatique)



(4) Source générant : - un éclairciment Rt périphérique (bâtonnets)
- avec du rouge, puis du jaune, du bleu, du vert...



Les bâtonnets sont insensibles au rouge

Corollaires :

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

C- LES CAPTEURS VISUELS :

(Voir cours de PCEM1)

C.I- Les dioptries, les systèmes centrés et les lentilles

Rappels d'optique géométrique (TD) : lois de Descartes pour la réfraction, dioptries (définition, points conjugués, exemple du dioptre sphérique), stigmatisme et conditions de Gauss, puissance d'un dioptre, convergence, divergence, relation de conjugaison, foyers, espaces objets et images ; étude des dioptries et lentilles minces sphériques, cylindriques et toriques

C.II- Dioptrique oculaire

C.III- Troubles dioptriques de la vision

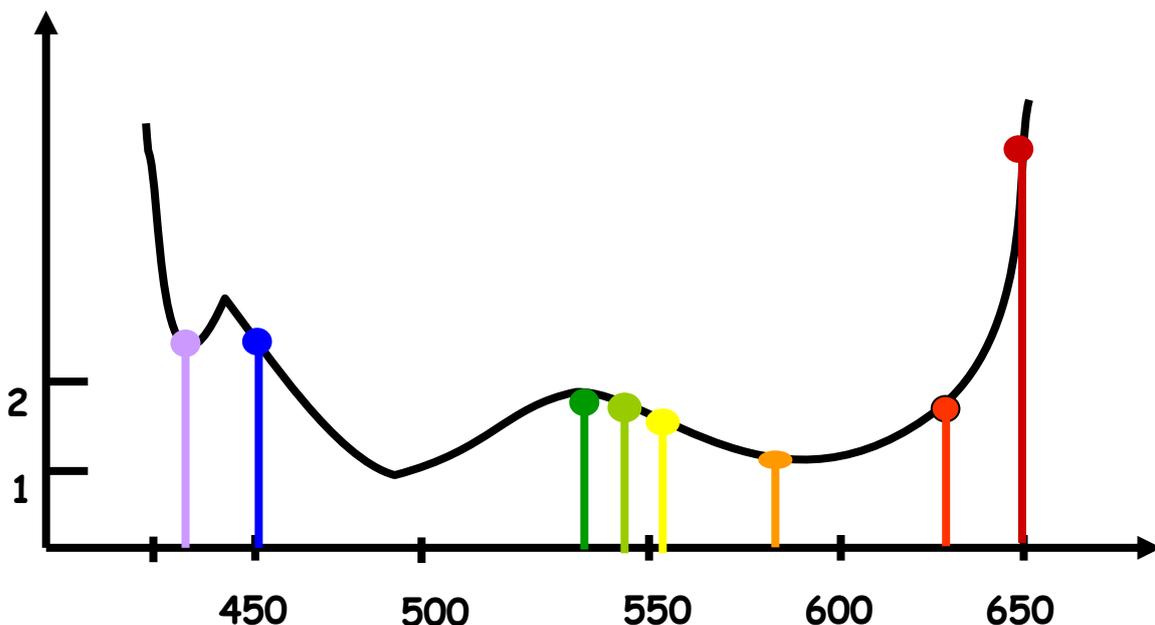
C.IV- Le transducteur

C.VI- Vision de couleurs

C.VI.1- Généralités

1. L'œil normal perçoit ≈ 1700 nuances colorées :

- on admet que la perception colorée se situe entre 450 et 750 nm, et comme on le voit, le seuil différentiel de sensibilité colorée est élevé dans le « 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 ;
- 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.



2. Distinguer entre vision de jour (photopique) et de nuit (scotopique) :

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

C.VI.2- La Trivariance Visuelle (TV)

\exists 2 systèmes avec chacun 3 qualités pour décrire sensat° lumineuse :

1. Le système monochromatique de TV

- Intensité (quantité) perçue, $\forall \lambda$ (couleur) : c'est la **Luminance L**
- Qualités chromatiques, décrites par :
 - la **tonalité**, ou teinte perçue, impression colorée non mesurable, repérée % λ connue produisant une sensation (colorée) identique
 - la **saturation**, fraction de lumière blanche qui délave la teinte (un bleu foncé est plus saturé qu'un bleu clair)

Corollaires :

- la luminance globale de la sensation perçue est le mélange des luminances de la teinte et du blanc (w) :
$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_\lambda + \mathbf{L}_w \quad [1.]$$
- saturation quantifiée par *facteur de pureté*
$$\mathbf{p} = \mathbf{L}_\lambda / (\mathbf{L}_\lambda + \mathbf{L}_w)$$

 $p = 1$ pour une couleur spectrale, totalement saturée (0 % de blanc)
 $p = 0$ pour le blanc (w), totalement désaturé (pas de λ de référence)

2. Le système trichrom(atique) de TV ou RVB

Moins physiologique mais plus facile à mesurer. Allusion directe aux 3 types de cônes

- Toute sensation colorée peut être générée par un mélange convenable de 3 *teintes* (λ , couleurs) *primaires*, Rouge (700 nm), Vert (546 nm) et Bleu (436 nm) :

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_R + \mathbf{L}_V + \mathbf{L}_B \quad [2.]$$

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

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

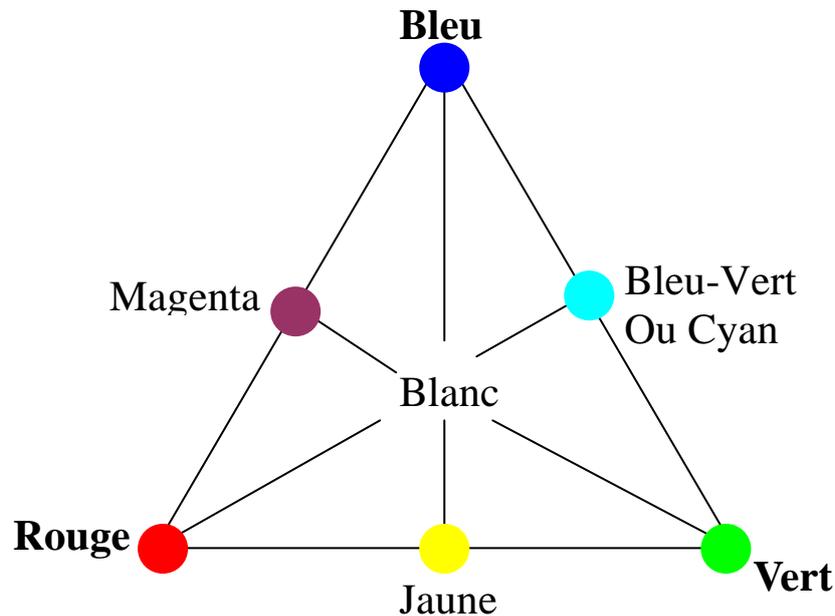
- Il existe un mélange particulier et unique qui donne du blanc :

$$\mathbf{L}_w = \mathbf{L}'_R + \mathbf{L}'_V + \mathbf{L}'_B \quad [3.]$$

- Système représentable par triangle (isoluminance) des couleurs, où tout mélange de couleurs appartient au triangle (figure ci-après).

- Deux couleurs sont complémentaires quand leur mélange (additif) donne du blanc :

$$\mathbf{L}_w = \mathbf{L}_\lambda + \mathbf{L}_{\lambda'}, \quad [4.]$$



C.VI.3- 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 $\mathbf{L}_1 = \mathbf{L}_2$, alors $\mathbf{k.L}_1 = \mathbf{k.L}_2$ et $\mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_3 = \mathbf{L}_2 + \mathbf{L}_3$

- Une combinaison de sensations visuelles est perçue comme une sensation unique, combinaison algébrique des sensations mélangées.
- Si le blanc qui « compose » une tonalité désaturée est issu d'une synthèse trichrome (équation [3.]), cette tonalité désaturée $\mathbf{L}_\lambda + \mathbf{L}_w$ fournira, par déduction algébrique, la tonalité saturée \mathbf{L}_λ déduite de [1.] et [2.] :

$$\mathbf{L}_\lambda = \mathbf{L}_R + \mathbf{L}_V + \mathbf{L}_B - \mathbf{L}_w \quad [5.]$$

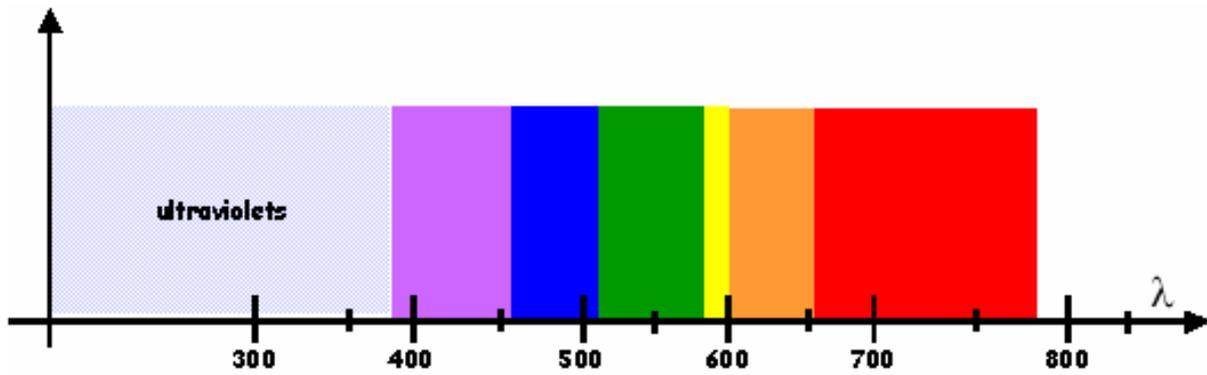
ou
$$\mathbf{L}_\lambda = (\mathbf{L}_R - \mathbf{L}'_R) + (\mathbf{L}_V - \mathbf{L}'_V) + (\mathbf{L}_B - \mathbf{L}'_B)$$

C.VI.4- Les différentes couleurs perçues

L'œil normal perçoit ≈ 1700 nuances colorées :

1. Les couleurs spectrales :

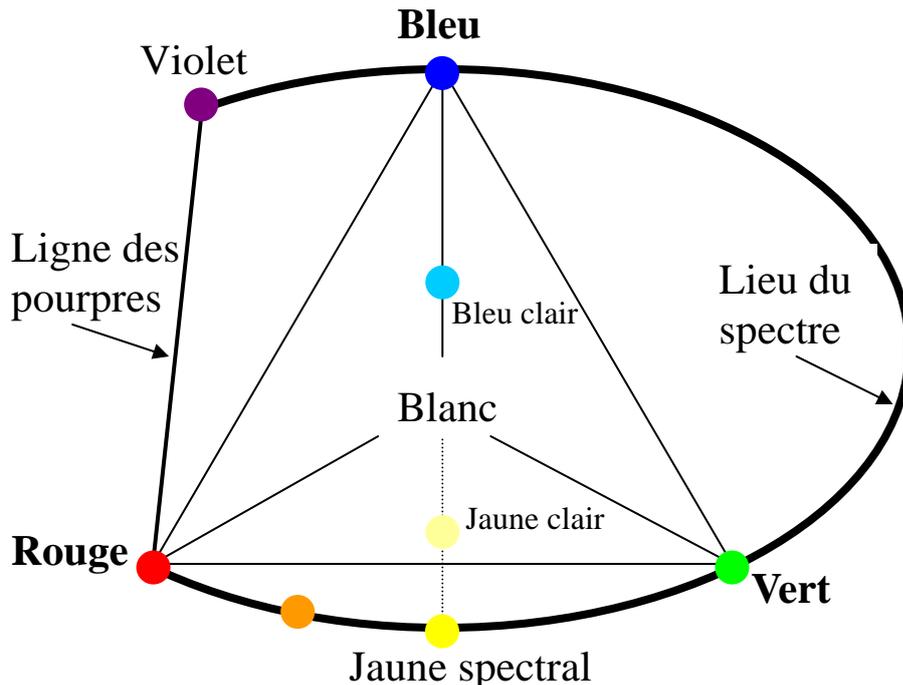
- générées par λ unique (monochromatisme) \in spectre visible [400, 700 nm]
- une couleur \neq est associée à chaque λ (spectre de raies),
- passage continu (spectre thermique), graduel ≈ 200 nuances colorées
- facteur de pureté, $p = 1, \forall \lambda$



- d'après [5.], pour obtenir une couleur spectrale L_λ , 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 » ici)

2. Les pourpres :

- Mélange (additif) de λ extrêmes du spectre visible (pourpre = (bleu-)violet + rouge)
- Selon proportions respectives, ≈ 100 nuances colorées, caractérisées par la λ de leur complémentaire (les verts)
- facteur de pureté, $p = 1, \forall$ pourpre



3. Les blancs :

Il en \exists de \neq sortes, selon le moyen de les fabriquer

- Les blancs thermiques : induits par spectres d'émission continue (étoile, lampe à incandescence). La température d'émission génère une λ_{\max} (jaune bleuté pour le soleil, $T_c \sim 5500^\circ\text{K}$ ou jaune rougeâtre pour ampoule tungstène, $T_c \sim 2700^\circ\text{K}$) qui confère à ce blanc 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 λ 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
 bleu-vert et rouge
 vert-jaune et violet

4. Les couleurs désaturées :

Elles fournissent les 1400 nuances restantes

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

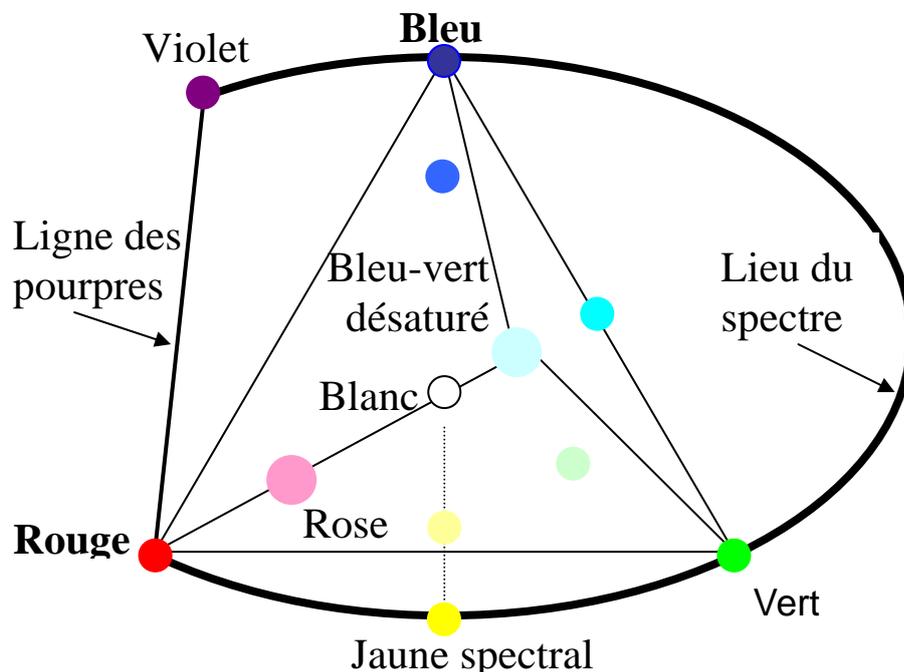
$$L = L_{\lambda_1} + L_{\lambda_2} = L_\lambda + L_w \quad \text{avec} \quad p = L_\lambda / L < 1$$

Par ex jaune + bleu = vert, rouge + vert = jaune

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

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

- Les autres tonalités décrites dans le langage courant (marrons, 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.



C.VI.5- Dyschromatopsies (Ds)

Ce sont les anomalies de la vision des couleurs

- L'Homme normal voit les couleurs grâce à 3 types de cônes différents
- Les Ds sont assez fréquentes (8% population) mais peu gênantes
- Diagnostic souvent tardif, mais pas de traitement ou correction ...

1. 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

2. Les dichromatopsies :

Une des primaires n'est pas perçue => 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

3. Les monochromatopsies

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

C.VI.6- Couleur des objets (sources secondaires) :

Objets éclairés = sources secondaires de lumière diffusée :

- la quantité de photons diffusés détermine la luminosité de l'objet,
- la qualité de cette diffusion (sélectivité en λ) en fixe la couleur.

Ces 2 aspects sont "facilement" prévisibles si l'on connaît le *coefficient de réflexion diffuse* ρ de l'objet (augmente avec le pouvoir diffusant de l'objet), défini comme le rapport de la radiance énergétique de l'objet à son éclairage énergétique :

$$\rho = R/E$$

- **Pour les corps "non sélectifs"**, ρ est indépendant de λ .
 1. ρ varie de 0,85 pour la magnésie (MgO) à 0,01 pour le velours noir.
 2. Corps lumineux (blanc en lumière blanche ou de la couleur spectrale en lumière monochromatique) si $\rho > 0,60$
 3. Corps sombre (noir) pour de faibles valeurs de ρ (0,05)
 4. Corps gris plus ou moins accentué pour des valeurs intermédiaires.
- **Pour les corps colorés (sélectifs)**, ρ dépend de λ .
 1. selon courbe de variat° spectrale caractéristique du corps diffusant.
 2. Couleur du corps déterminée par portion diffusée du spectre,
 3. Luminosité du corps déterminée par valeur de ρ dans cette portion.
 4. Exemple : objet très sélectif absorbant beaucoup de vert et de bleu ($\rho_{\text{vert}} = \rho_{\text{bleu}} = 0,2$). S'il diffuse presque tout le rouge ($\rho_{\text{rouge}} = 0,9$), éclairé par un mélange RVB blanc, il donnera l'impression d'un rouge un peu désaturé (0,7 de rouge pour 0,2 de blanc) mais très lumineux, tandis qu'il apparaîtra rouge d'autant plus sombre, voire gris foncé, qu'il diffuse moins de

rouge. Eclairé en lumière monochromatique, c'est le $\rho(\lambda)$ correspondant qui déterminera sa couleur et sa luminosité. Ainsi :

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

Remarques :

- 1) 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.
- 2) $R = \rho \cdot E = \pi \cdot B$, 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 ...
- 3) L'*albédo* des astronomes (planétologues) est le pouvoir réfléchissant d'un corps céleste (une planète, un astéroïde, un satellite, ...) dans le système solaire ; c'est une forme de coefficient de réflexion diffuse 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.