

**Unite: Appareil Neurosensoriel**  
**APPAREIL NERVEUX ET ORGANES DES SENS**  
**Biophysique de la vision**

(4 séances= 6h)

**1- Notions de lumière** (aspect ondulatoire, corpusculaire, sources lumineuses).

**2- Notions de photométrie et radiométrie** (mesure des paramètres physiques)

**3- Message sensoriel:** Trivariance visuelle, système monochromatique, système polychromatique.

**4- Anomalies de la vision des couleurs:** Dyschromatopsies

**5-Photochimie de la rétine**

**6-Tomographie par cohérence optique (OCT)**

## **Objectifs**

- **Expliquer les notions physiques de base a l'origine du message sensoriel**
- **Décrire la vision des couleurs et leurs anomalies**
- **Décrire les méthodes subjectives et objectives d'examens des caractéristiques oculaires**
- **Expliquer la cohérence optique et les bases de l'imagerie retinienne.**

# Généralités 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, ....

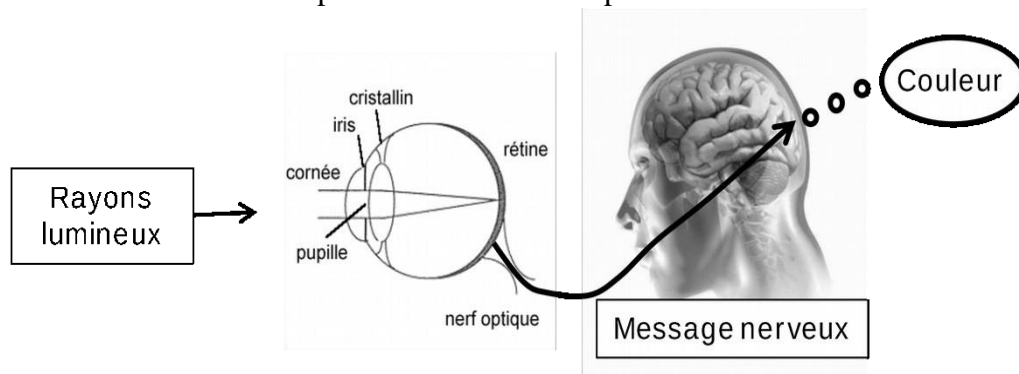
Dans les cas de la vision et de l'audition, la chaîne peut être décrite comme suit :

Chaîne sensorielle	Vision	Audition	Exploration
<b>Signal (message physique)</b>	REM visible ( $400 < \lambda < 750 \text{ nm}$ )	vibration sonore	Physique
<b>Capture du signal</b>	globe oculaire	oreille externe et moyenne	Biophysique Electrophysiologie
<b>Transduction</b>	rétine	cochlée	Biochimie
<b>Transmission</b>	voies optiques	voies auditives	Pathologies
<b>Analyse et interprétation</b>	cortex occipital	Cortex temporal	Imagerie fonctionnelle (TEP, TEM, IRMf)

- L'analyse est effectuée dans les centres nerveux ; elle permet l'interprétation du signal perçu.
- 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.

## Biophysique de la vision

Dans le mécanisme de la vision, les rayons lumineux pénètrent dans l'œil par la pupille, sont déviés par le cristallin, puis viennent frapper la rétine. C'est ensuite un processus chimique qui envoie un message par le nerf optique, au cerveau. Celui-ci interprète les informations par une sensation de couleur ou de luminosité.



La chaîne visuelle comprend :

- 1- Un organe, l'œil, assurant le recueil et la transduction du message physique (onde lumineuse)
- 2- Des voies nerveuses assurant la transmission au cortex de l'information recueillie
- 3- Des centres corticaux assurant l'analyse et le traitement de l'information aboutissant à la perception d'un message sensoriel : l'image en couleur et en relief.

# I- Signal physique

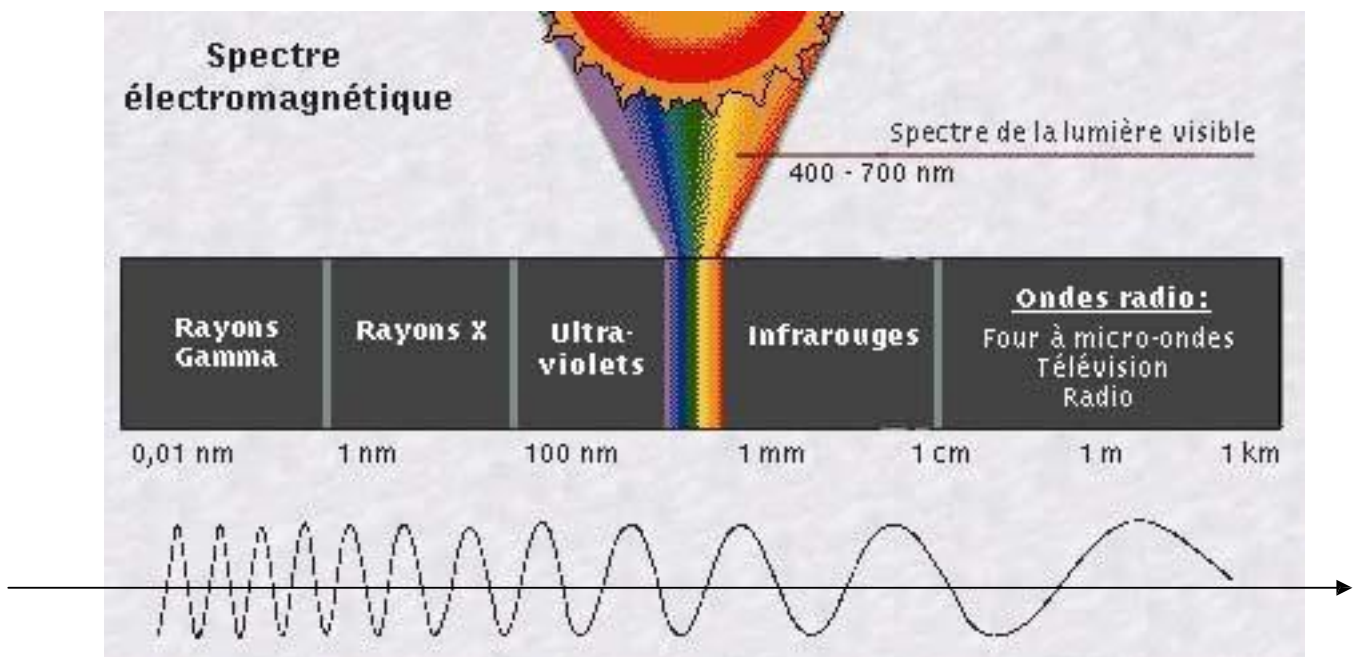
Le signal physique est constitué d'ondes lumineuses en provenance de points précis.

## 1- Lumière :

est un phénomène physique qui peut produire une sensation visuelle. Le message lumineux est une onde : il consiste en un transport d'information (énergie) sans transport de la matière.

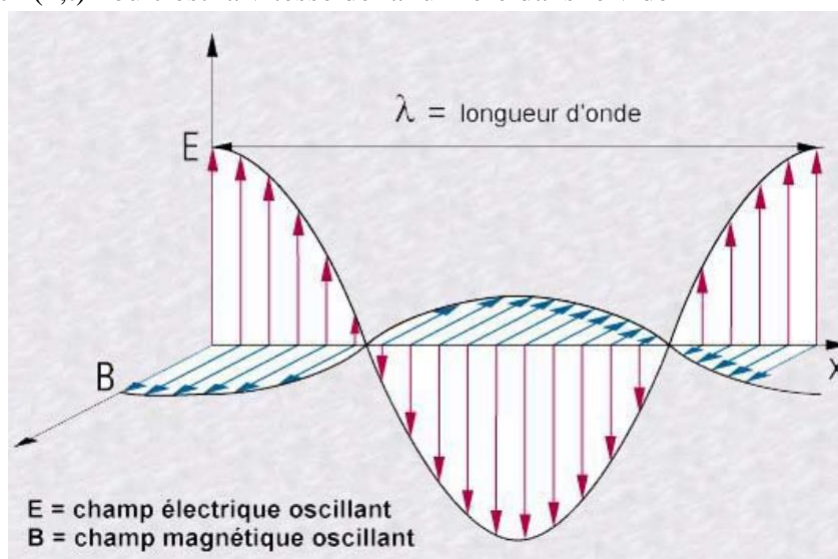
- Correspond à la vibration d'un champ électromagnétique,
- Peut se propager dans le vide ( $C=3.10^8 \text{ ms}^{-1}$ )
- Est de fréquence de l'ordre de  $10^{15} \text{ Hz}$
- Ne représente qu'une faible partie (visible) du domaine spectral des ondes électromagnétiques de même nature.

## Classement des ondes (EM) suivant leur longueur d'onde dans le vide



## 1a- Description ondulatoire de la lumière

- Elle est décrite par les équations de Maxwell
- Les deux champs électrique  $E$  et magnétique  $B$  sont perpendiculaires.
- $E(x,t)=cB(x,t)$  ou  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide



- La lumière se propage perpendiculairement à la superposition des deux champs, avec une fréquence  $\nu$ , une période  $T=1/\nu$  et une longueur d'onde  $\lambda=cT$ .
- Lumière atteignant la rétine : 350 nm à 1400 nm
- Lumière solaire visible : 400 nm à 700 nm
- Fréquence fixe correspond à une onde ou lumière monochromatique exemple: couleur bleue
- Gamme de fréquences correspond à une lumière polychromatique exemple: couleur blanche

## 1b-Description corpusculaire de la lumière

- Le rayonnement est un ensemble de particules (photons) se propageant à la vitesse de la lumière le long de l'axe Ox.
- La masse des photons au repos est nulle
- $E = h \nu$ , avec h constante de Planck (Remarque :  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s, E en J,  $\nu$  fréquence en Hz)

## Complémentarité des deux descriptions

**Aspect corpusculaire** : Rayonnements très énergétiques, les phénomènes ondulatoires ont une influence trop faible pour être pris en compte

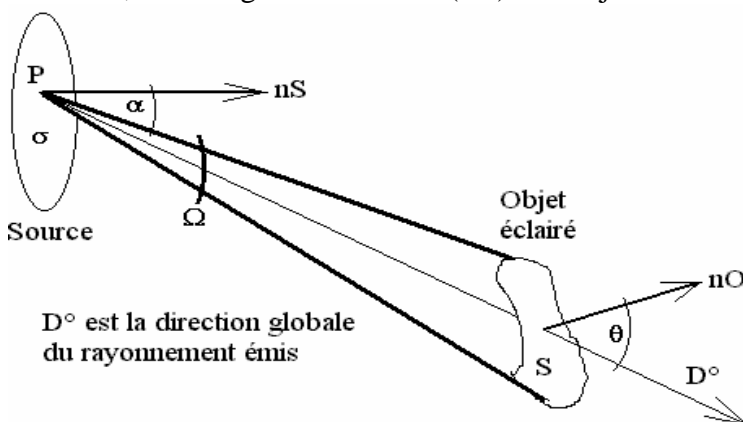
**Aspect Ondulatoire** : Rayonnements peu énergétiques, les photons ont une énergie trop faible pour interagir avec la matière

## Dualité onde- corpuscule

- A toute onde, on peut associer un corpuscule de masse m et réciproquement (vitesse v)
- Longueur d'onde de Broglie alors  $\lambda = h / (m \cdot v)$
- Utile pour les corpuscules de masse faible (particules).

## 2- Généralités sur les sources d'émission de REM

Soit une source étendue de surface  $\sigma$ , émettant dans une direction  $D^\circ$  donnée, vers un objet éclairé de section S, dans un angle solide  $\Omega$  (figure 1).  $D^\circ$  fait un angle  $\alpha$  avec la normale ( $n_S$ ) à la section de la source, et un angle  $\theta$  avec celle ( $n_O$ ) de l'objet.

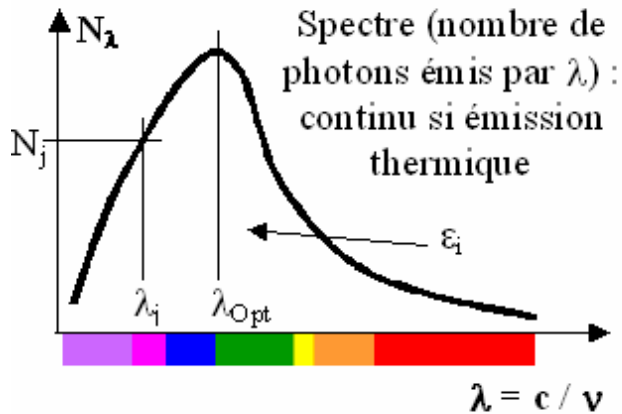


**Figure 1**

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

On distingue deux types de sources lumineuses :

**2a- Sources primaires** : produisent de la lumière. (Lampes, soleil, étoiles...) par émission thermique ou quantique. **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.



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

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

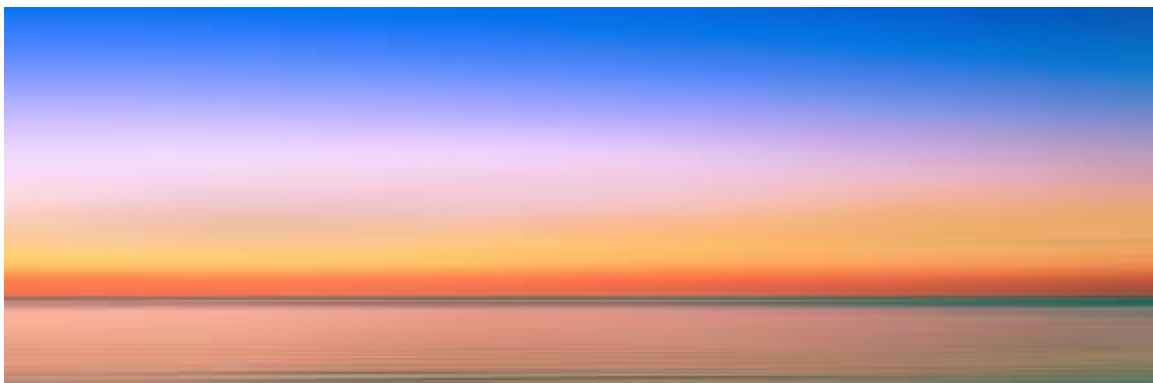
La source est dite "**radiateur intégral**" si elle émet tous les rayonnements produits, et "**corps noir**" si elle absorbe tous ceux reçus (pas de rayonnements réfléchis).

**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).

**2b- Sources secondaires** : objets qui renvoient une partie de la lumière qu'ils reçoivent.

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.

**Application : Les couleurs du ciel**



Les 3 phénomènes qui permettent de voir les couleurs du ciel sont:

1. la diffusion ( le ciel est bleu);
2. la réfraction (les arcs-en-ciel en sont le résultat);
3. la diffraction (comme les anneaux colorés, les couronnes, ...)

## Pourquoi le ciel est bleu ?

Les rayons du soleil se propagent dans l'atmosphère sous formes d'ondes invisibles. Ces ondes rectilignes nous apparaissent blanches, mais en fait elles sont un mélange de couleurs de la partie visible du spectre électromagnétique. Les couleurs (de la plus petite longueur d'onde à la plus longue) sont: **violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange, rouge**. Chaque couleur a une longueur d'onde bien spécifique qui la caractérise.

La diffusion de Rayleigh est due aux **molécules gazeuses** présentes dans l'atmosphère (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, vapeur d'eau, etc.) et aux très fines particules de poussière. **Elle se produit lorsque la taille des particules diffusantes est très inférieure à la longueur d'onde du rayonnement.**

Par exemple, le ciel nous apparaît bleu parce que ce sont les longueurs d'onde les plus courtes qui sont le plus diffusées, ou diffusées le plus efficacement, par les molécules d'eau ou les poussières en suspension dans l'air. Evidemment, selon la région dans laquelle on se trouve, le bleu du ciel sera un peu différent. La proportion du jaune et du vert peut être amplifiée au-dessus des régions peuplées, à cause de la plus grande quantité de poussières dans l'air; le ciel apparaît alors plus clair qu'au-dessus de régions peu urbanisées.

## Pourquoi la nuit est-elle noire ?

L'explication vient cette fois de notre capacité de perception de la lumière, donc de notre rétine. Celle-ci est constituée de cônes et de bâtonnets. **Seuls les bâtonnets sont sensibles aux faibles lumières et ils ne perçoivent pas les couleurs** (la nuit tous les chats sont gris), contrairement aux cônes, sensibles aux couleurs, qui sont actifs en lumière plus intense.

## II- Notions de photométrie et de radiométrie

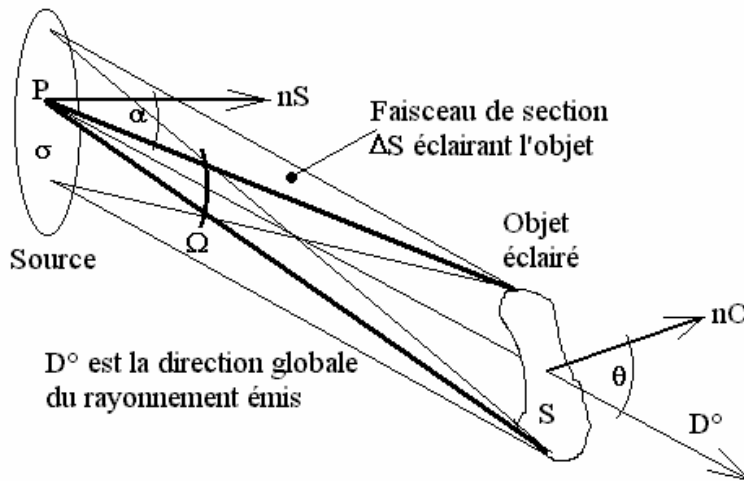
- **La radiométrie** est le domaine qui étudie la mesure de l'énergie des rayonnements électromagnétiques, y compris la lumière visible.

- **La photométrie** est la science qui étudie le rayonnement lumineux du point de vue de la luminosité perçue par l'œil humain, plutôt que l'énergie totale du rayonnement.

### 1- Grandeurs radiométriques (Mesure de la quantité de lumière)

L'onde lumineuse, signal physique, peut être caractérisée par la mesure de paramètres physiques

Ces grandeurs 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, ...).



L'énergie totale transportée par le faisceau est la contribution de toutes les sources ponctuelles dans  $\sigma$ .

### 1a- Flux énergétique $\Phi$ (watt)

Le **flux énergétique  $\Phi$**  est l'énergie transportée par seconde, exprimée en Watt.

$$\Phi = dE / dt.$$

### 1b- Intensité énergétique $I$ (Watt.sd<sup>-1</sup>)

L'**intensité énergétique  $I$**  d'une source ponctuelle  $P_i$  émise dans la direction  $D^\circ$  de l'objet est alors donnée par le flux dans l'angle solide  $\Omega$  :

$$I = d\Phi / d\Omega \quad (\text{Watt.sd}^{-1})$$

L'angle solide s'exprime en steradian (sd)

### 1c- Brillance énergétique $B$ (Watt.m<sup>-2</sup>.sd<sup>-1</sup>)

Pour une source étendue, on définit la **brillance (ou luminance) énergétique  $B$**  de la source dans la seule direction  $D^\circ$  de l'objet comme l'intensité énergétique globale par unité de surface de source. Elle caractérise l'émission d'une source étendue dans une direction donnée.

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

### 1d- Radiance énergétique $R$ (Watt.m<sup>-2</sup>)

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 :

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

### 1e- Eclairement énergétique $E$ (Watt.m<sup>-2</sup>)

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

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

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

En effet

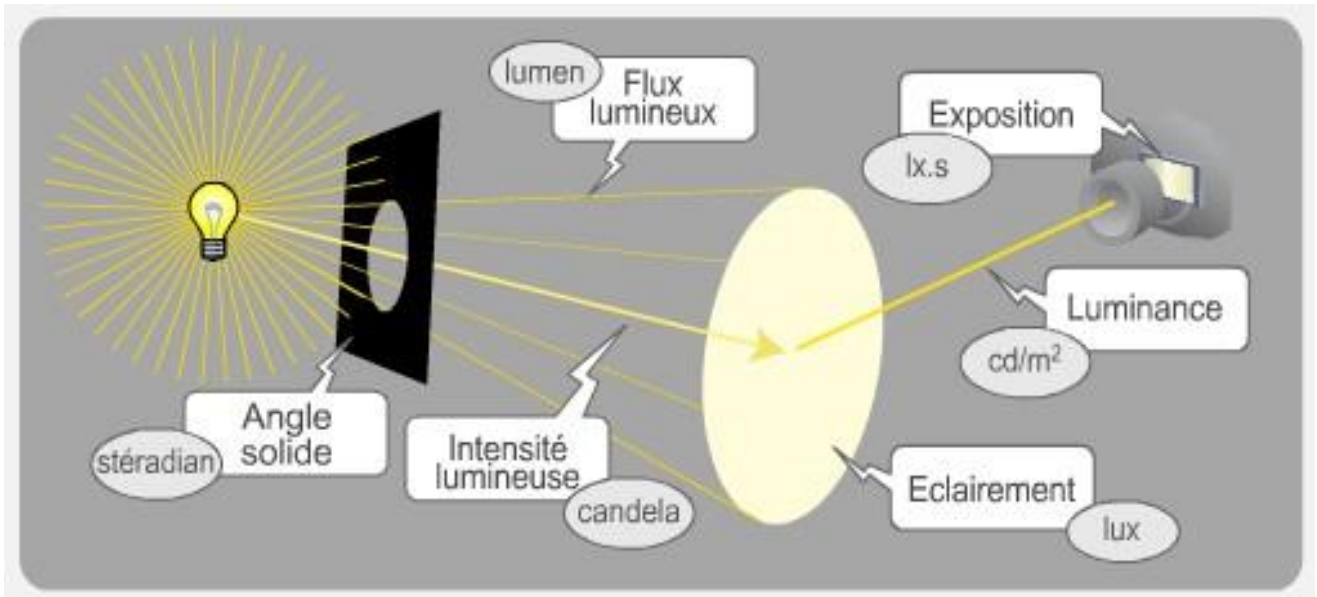
$$I = d\Phi / d\Omega = d\Phi \cdot r^2 / (dS \cdot \cos\theta) = E \cdot r^2 / \cos\theta$$

C'est la loi de l'inverse carré de la distance (le faisceau éclairant S est conique).

Toutes ces grandeurs énergétiques s'appliquent au rayonnement total, à une source monochromatique et à une source non monochromatique.

## 2 Grandeurs photométriques

Ces grandeurs sont qualifiées de lumineuses pour les distinguer des grandeurs paramétriques qualifiées d'énergétiques. Le parallélisme est absolu.



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

### 2a- L'intensité lumineuse I (candela)

du faisceau lumineux est directement reliée à la luminance de la source (cf. fig. 1) par la relation :

$$I = L \cdot \sigma \cdot \cos\alpha \quad (\text{candela, cd})$$

Une **candela** (nouvelle bougie) mesure l'intensité lumineuse, dans une direction déterminée, ( $D^\circ$ ) 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 ( $2028^\circ\text{K}$ )

### 2b- Le flux lumineux $\Phi$ (lumen)

C'est l'intensité lumineuse rayonnée dans un angle solide donné par :

$$\Phi = I \cdot \Omega \quad (\text{lumen})$$



## 2c- L'éclairement lumineux $E$ ( $\text{lumen.m}^{-2} = \text{lux}$ )

ou densité surfacique de flux capté par l'objet (surface  $S$ ) est donné par :

$$E = \Phi / S \quad (\text{lux})$$

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 distance)

## 2d-La luminance, $L$ ( $\text{cd.m}^{-2}$ ) ou (10 nits) ou ( $\text{lumen.m}^{-2}.\text{sd}^{-1}$ )

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  $\sigma$ ) :

$$L = I / (\sigma \cdot \cos\alpha) \quad (1 \text{ cd/m}^2 = 10 \text{ nits})$$

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	$1,5 \cdot 10^9$

### III- Message sensoriel

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.

Transformation des grandeurs radiométriques en grandeurs photométriques, physiologiques.

#### 1- Trivariance visuelle (TV)

L'expérience montre que toute sensation lumineuse peut être entièrement caractérisée par 3 variables indépendantes : trivariance visuelle (TV)

##### 1a- Le système monochromatique de TV

Dans ce système, seule la  $\lambda$  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  $\lambda$  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  $L_\lambda$  (intensité de la teinte) et l'autre une quantité donnée de lumière blanche,  $L_w$  :

$$L = L_\lambda + L_w \quad (\text{fonction trivariance})$$

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) :

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

Ce mode de représentation tri variante d'une sensation colorée s'appelle le système monochromatique car une seule longueur d'onde intervient dans cette représentation : la longueur d'onde dominante

## 1b- 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. La sensation est alors définie par la luminance de chacune des 3 sources colorées, d'où 3 variables qui présentent l'avantage d'être toutes trois mesurables.

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

$L_R$ ,  $L_V$  et  $L_B$  désignent respectivement les luminances des 3 teintes R, V et B.

Trois couleurs interviennent dans ce mode de représentation trivariante d'une sensation colorée, d'où l'appellation de système trichome.

## 2- Analyse du message sensoriel à partir des trois qualités physiologiques

### Notion de luminance

#### 2a- Luminance (perçue) et brillance énergétique (source)

La sensation qui nous fait dire qu'une lumière est plus ou moins intense est liée principalement à l'éclairement énergétique de la rétine (photorécepteurs) lui-même proportionnel à la brillance énergétique de la source lumineuse (si l'on néglige les variations du diamètre pupillaire).

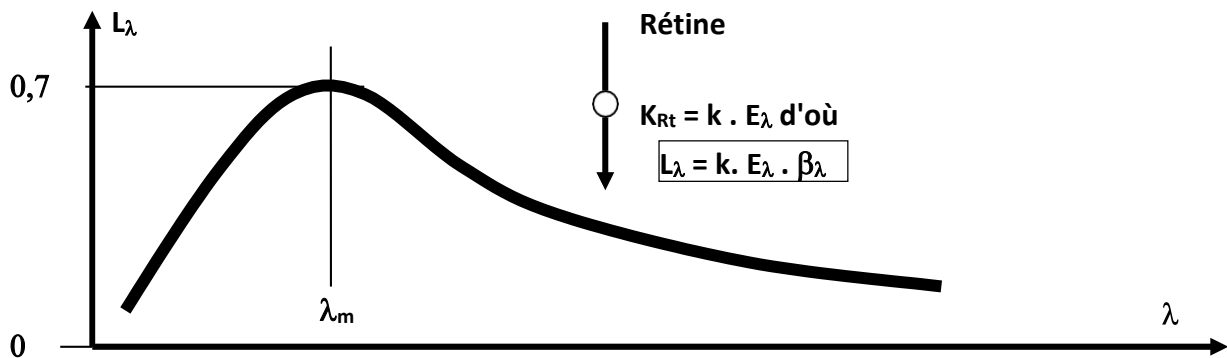
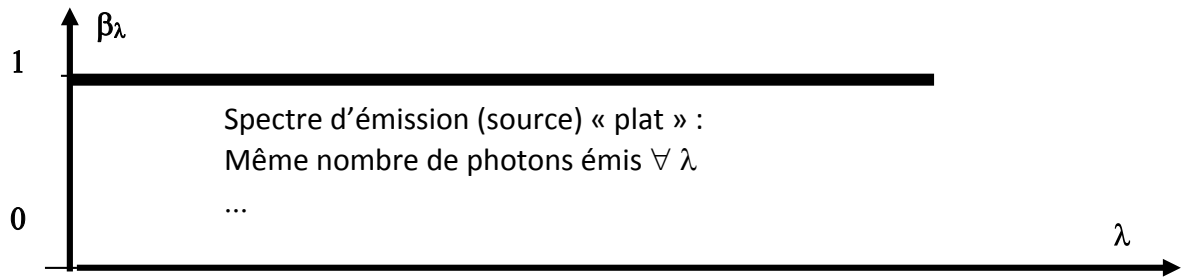
- On peut écrire :  $\mathbf{L} = \mathbf{K}_{Rt} \cdot \mathbf{B}$ , où  $K_{Rt}$  est un simple coefficient de proportionnalité.

**En résumé** : Proportionnalité entre perception et signal :

Sensation lumineuse (grandeur photométrique) = Interprétation du signal (grandeur radiométrique) par détecteurs rétinien,  $R_t$ , cônes et bâtonnets.

#### Remarque:

- 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.
- Si 2 sources monochromatiques de même  $\lambda$  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  $\lambda$  différentes : l'égalité des luminances de 2 sensations de couleur différente ne correspond plus à celle des brillances énergétiques, et l'on peut écrire:  
pour un L identique, si  $\lambda_1 \neq \lambda_2$   $B_{\lambda_1} \neq B_{\lambda_2}$
- Imaginons alors une source (radiométrique) théorique de  $\beta_\lambda$  constante  $\forall \lambda$  : on observe que le rendement de la perception rétinienne varie avec  $\lambda$



- On appelle **efficacité lumineuse** d'une source à la longueur d'onde  $\lambda$ , le facteur  $E_\lambda$  qui varie avec  $\lambda$ .

$$E_\lambda = K_{RT} / k = L_\lambda / (K_{RT} \cdot B_\lambda).$$

$$E_\lambda = 1 \text{ pour } \lambda = \lambda_m \text{ et } E_\lambda < 1 \forall \lambda \neq \lambda_m$$

## 2b- 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'œil 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  $\lambda_m$ , c'est à cette longueur d'onde qu'il faudra la brillance de source la plus faible ( $B_{\lambda_m}$ ) 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  $L_\lambda = k \cdot E_\lambda \cdot \beta_\lambda$

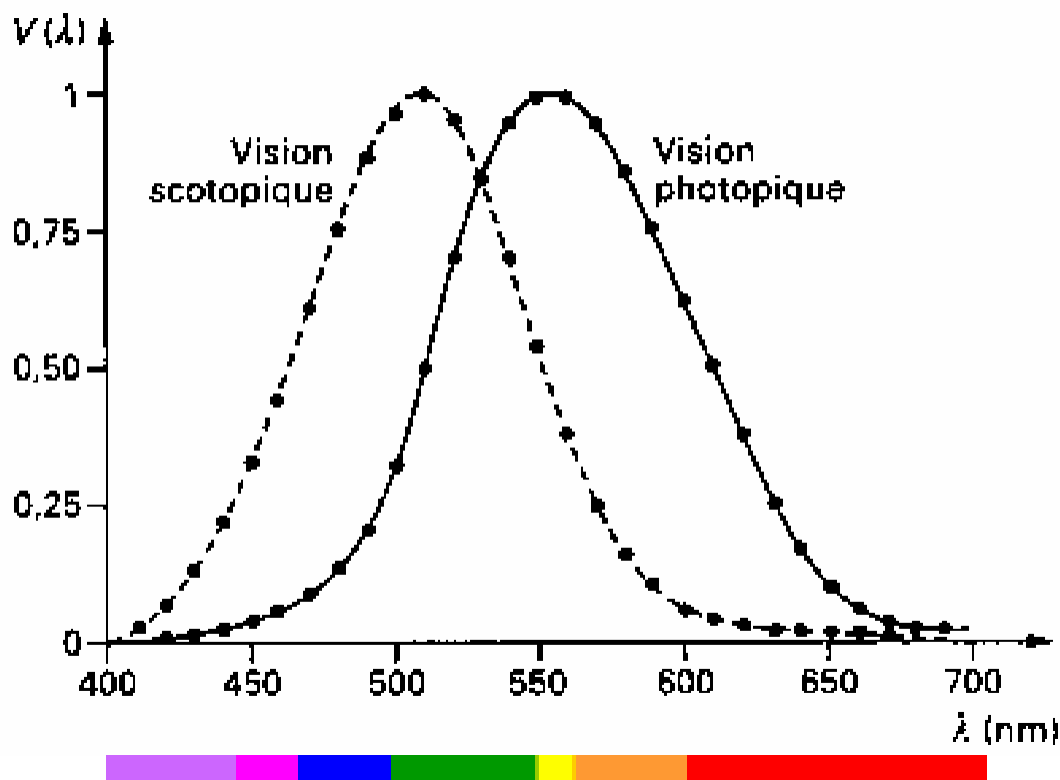
et  $L_{\lambda_m} = k \cdot E_{\lambda_m} \cdot \beta_{\lambda_m}$

Ainsi, si  $L_\lambda = L_{\lambda_m}$

alors  $B_{\lambda_m} = E_{\lambda_m} / E_\lambda = V_\lambda \cdot B_\lambda$

avec  $0 \leq V_\lambda \leq 1$

$V_\lambda = B_{\lambda_m} / B_\lambda$  est le **coefficient d'efficacité lumineuse**. Ses variations en fonction de  $\lambda$  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* :



Ces courbes montrent 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 et les bâtonnets insensibles au rouge.

## 2c- Mesure de la Luminance

$V_\lambda$  permet de définir, par convention par rapport à la courbe d'efficacité lumineuse photopique, la **luminance**, ou **intensité perçue**  $L_\lambda$ , d'une source colorée :

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

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.

- **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 ...

## 2d- 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 éclairage à l'obscurité (éclairage (très) faible) nécessite un temps d'adaptation ± long

Nous pouvons déduire:

- **Les bâtonnets sont beaucoup plus sensibles que les cônes** mais beaucoup plus lents à s'adapter.
- Les bâtonnets sont insensibles au 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

## 2e- Les différentes couleurs perçues

L'œil normal perçoit ≈ 1700 nuances colorées :

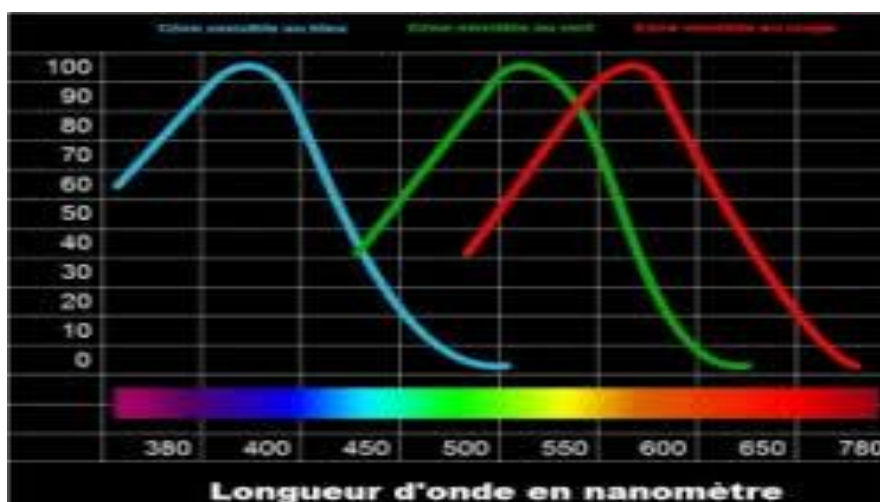
- on admet que la perception colorée se situe entre 450 et 750 nm, et comme on le voit, le seuil différentiel de sensibilité colorée est élevé dans le « visible » (entre 490 et 590 nm, la rétine humaine peut identifier des couleurs ne différant entre elles que d'un seul nanomètre) mais se dégrade fortement en-deçà et au-delà ; en particulier, la sensation colorée est uniforme pour tous les rouges de 680 à 750 nm ;

## VI Anomalies de la vision des couleurs: Dyschromatopsies (Ds)

Ce sont les anomalies de la vision des couleurs.

L'homme normal voit les couleurs grâce à 3 types de cônes différents.

Chaque cône présente un maximum de sensibilité pour une certaine longueur d'onde



- Ces troubles le plus souvent héréditaires liés au sexe, touchent 8% des hommes et 0,5 % des femmes.
- Diagnostic souvent tardif, mais pas de traitement ou correction ...

## 1. Les trichromatopsies anormales :

Le plus souvent congénitales dues à des recombinaisons entre gènes codant différents types de pigments, ce qui conduit à des pigments intermédiaires. Le sujet perçoit bien les 3 couleurs primaires, mais en proportion différente du sujet normal.

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 (confusion gris, rouge et bleu vert)

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

Les tritanopes ne perçoivent pas le bleu : c'est exceptionnel (1%).

## 3. Les monochromatopsies

Cette anomalie est due à l'absence de cônes fonctionnels (achromatopsie normale) d'où une acuité visuelle très dégradée comme en vision nocturne.

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

Exceptionnellement le dysfonctionnement peut être d'origine neurologique (achromatopsie anormale) dans le cas où la vision par les cônes est conservée avec une acuité visuelle normale.

# V- Photochimie de la rétine

La rétine de l'œil est constituée de deux types de récepteurs, les cônes et les bâtonnets. Ils détectent la lumière grâce à une réaction photochimique.

-Les bâtonnets : Nombre : environ 1 milliard. Sensibilité : Ils sont capables de détecter une lumière de faible intensité mais ne différencient pas les couleurs.

-Les cônes: Nombre: de l'ordre de 3 millions. Sensibilité: 100 fois plus faible que les bâtonnets, ils n'agissent qu'en lumière intense et permettent de distinguer les couleurs puisqu'ils sont composés de trois cellules absorbant sélectivement le rouge, le vert ou le bleu.

## Photochimie

La rétine est tapissée de cellules photo-réceptrices que sont les bâtonnets et les cônes.

### Vision nocturne

Les bâtonnets sont sensibles à la luminosité, ils contiennent de la rhodopsine (pourpre rétinien) qui explique la couleur de la rétine, un assemblage d'une chromoprotéine (M=270000) composée d'une protéine, l'opsine, et d'un groupement prosthétique, le rétinol (aldéhyde de la vitamine A).

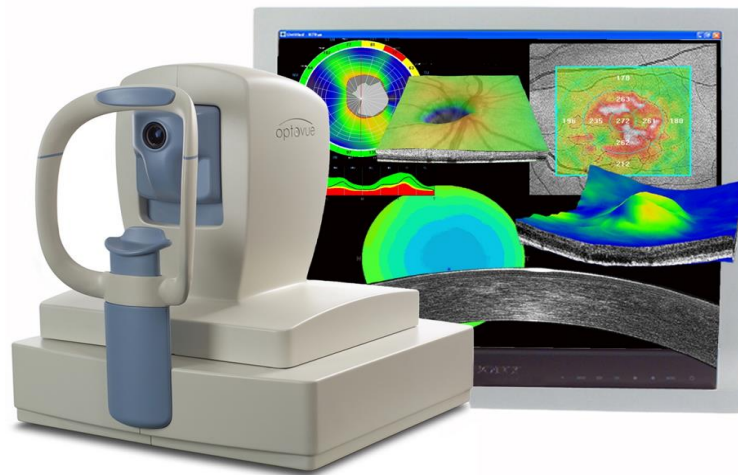
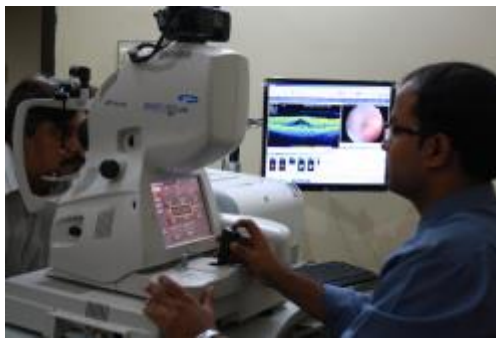
Le rétinol est une molécule présente dans les deux types de cellules, lorsqu'un photon est absorbé par la rhodopsine, le Z-rétinol se transforme en E-rétinol. Cette isomérisation quasi immédiate est à l'origine de la libération de l'opsine ce qui correspond pour le cerveau à la réception d'un influx nerveux indicateur de réception de lumière, puis la rhodopsine est régénérée.





## IV-Tomographie par cohérence optique (OCT)

- La tomographie par cohérence optique s'apparente à une échographie optique, où la lumière infrarouge vient remplacer les ultrasons. La lumière optique du laser est composée d'ondes de lumière cohérente, à partir desquelles sont produites des images en coupe : c'est le procédé de la tomographie.
- Cette pratique a d'abord été mise au point pour examiner le fond d'œil, plus spécifiquement la rétine, dans les cas de perte d'acuité visuelle. Aujourd'hui, cette technique s'est développée et permet également d'étudier le nerf optique ainsi que le segment antérieur de l'œil.

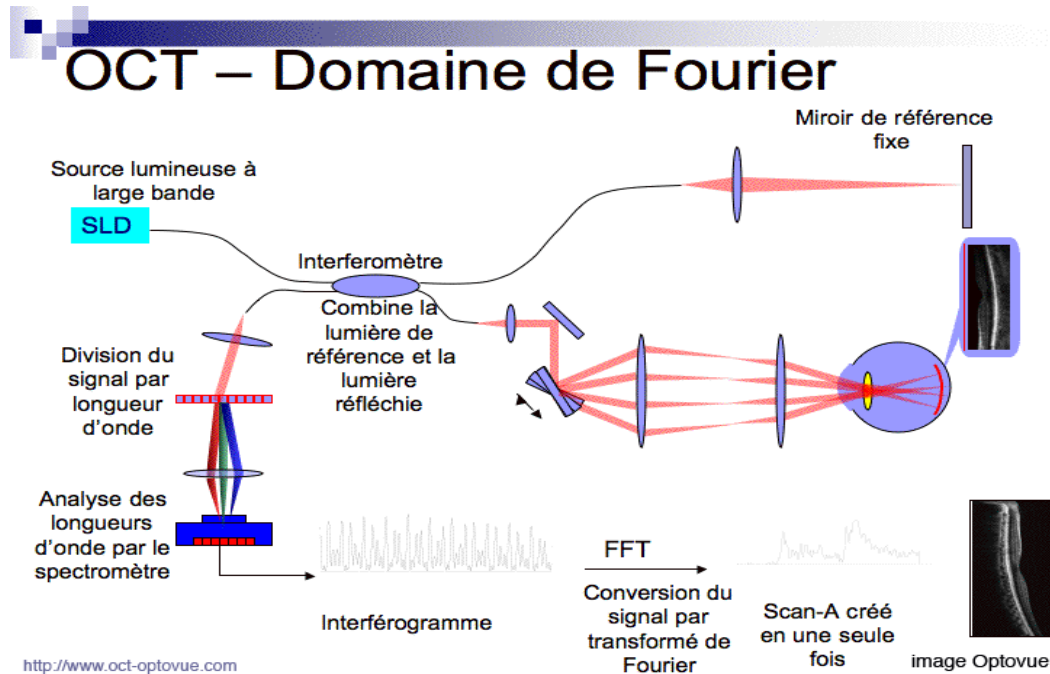


### Principe de l'OCT

- La tomographie par cohérence optique est considérée comme l'analogue optique de l'imagerie ultrasonore. Seulement, au lieu d'ondes sonores, une lumière laser spéciale et totalement inoffensive est utilisée.  
La lumière (optique) de laser est constituée d'ondes de lumière cohérente (cohérence) pour produire des images en coupe (tomographie)

Le système optique projette une lumière laser sur un miroir semi-réfléchissant placé à 45 degrés, et qui sépare le faisceau en deux. Une partie va éclairer une surface de référence, tandis que l'autre partie va éclairer la cible (la rétine habituellement). C'est le principe de l'interférométrie.

Les deux faisceaux sont dirigés sur la fente d'entrée du spectroscopie qui va entraîner la création d'interférences qui seront enregistrées et permettront grâce à un traitement mathématique (Transformation de Fourier optique) la formation d'images.



D'une étude des temps de trajet de l'OCT Time Domain, on est ainsi arrivé à l'étude des fréquences des rayons réfractés pour l'OCT spectralement résolue.

- Ce type d'examen ne nécessite pas systématiquement de dilater les pupilles au préalable. Le patient fixe un point lumineux, tandis qu'un faisceau de lumière balaye sa rétine. En parallèle, l'ophtalmologiste ajuste les paramètres de contrôle, modifie la position de la coupe observe en détail la rétine et évalue l'épaisseur des différentes zones.
- L'OCT permet de visualiser les structures de l'œil avec une résolution atteignant le micromètre, en temps réel et sans contact. En réalisant des coupes de la macula, il permet d'arriver à une image approchant de l'aspect histologique. Grâce à la visualisation du néo-vaisseau, l'ophtalmologiste peut notamment juger de la présence d'œdème maculaire diabétique, ou de décollement de l'épithélium pigmentaire. Il s'agit aussi à l'heure actuelle de l'examen prescrit en première intention lors de DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge).