

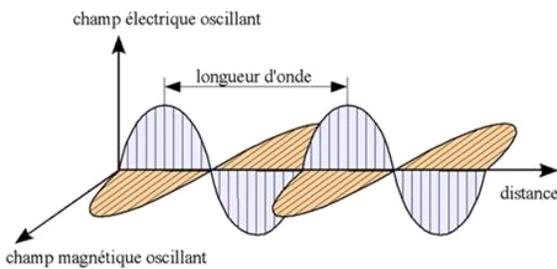
1. BIOPHYSIQUE DE LA VISION

1.1. Introduction aux Rayonnements Electromagnétiques

Un Rayonnement Electromagnétique est constitué d'onde Electromagnétique (Onde E.M). L'onde E.M est une association d'un champ électrique \vec{E} sinusoïdale et un champ magnétique sinusoïdale \vec{B} ayant une même fréquence ν .

L'onde E.M résultante $\vec{E} + \vec{B}$ aura elle aussi la même fréquence ν

Les champs \vec{E} et \vec{B} constituent l'onde E.M sont, à tout instant, perpendiculaires l'un à l'autre. Ils se propagent selon une direction perpendiculaire à leur plan (\vec{E} , \vec{B}) avec une célérité égale à celle de la lumière $c = 3.10^8$ m/s (dans le vide)



Une onde E.M se caractérise par :

- Sa fréquence ν en Hertz symbole ($Hz = s^{-1}$)
- Sa période T en seconde (s) ($T = \frac{1}{\nu}$)
- Sa longueur d'onde λ (m) : Elle représente la distance parcourue par l'onde pendant une période T

$$\lambda = c.T = \frac{c}{\nu}$$

- Son énergie E : Cette énergie est quantifiée dans la mesure où elle est formée de quantités infimes d'énergies (quanta d'énergies) appelées "PHOTON". Chaque Photon transporte une quantité d'énergie

$$E = h\nu = \frac{h}{T} = \frac{hc}{\lambda}$$

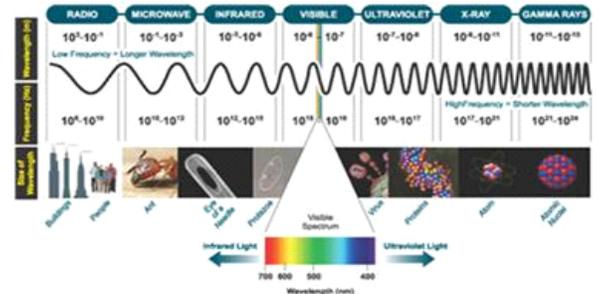
Avec : $h = 6,625.10^{-34}(S.I) = C^{te} \text{ de Planck}$

Le photon est une particule sans masse qui se propage avec une célérité égale à 3.10^8 m/s.

1.1.1. Famille des ondes électromagnétiques :

On classe les Ondes E.M selon leur longueur d'onde (ou selon leur fréquence) par domaines

Domaine	$[\lambda(m)]$	$[\nu(Hz)]$
Ondes de puissance	∞ à 3.10^5	0 à 10^3
Ondes radio	3.10^5 à 0,3	10^3 à 10^9
Micro-ondes	0,3 à 3.10^{-3}	10^9 à 10^{11}
Infrarouges	3.10^{-3} à 8.10^{-7}	10^{11} à 10^{14}
Visibles	8.10^{-7} à 4.10^{-7}	4.10^{14} à 7.10^{14}
Ultraviolets	4.10^{-7} à 3.10^{-9}	10^{15} à 10^{17}
RayX et Ray γ	3.10^{-9} à 3.10^{-13}	10^{17} à 10^{20}
Ray Cosmiques	$< 3.10^{-14}$	$> 10^{20}$



1.2. Radiométrie

La radiométrie est la mesure de l'énergie transportée par un rayonnement électromagnétique à l'aide d'un récepteur non sélective

Flux énergétique Φ C'est la quantité d'énergie qui traverse une surface par unité de temps

Son unité est le watt

Eclairement énergétique ξ Représente le flux élémentaire $d\Phi$ par une de surface dS . Il s'exprime en $watt.m^{-2}$

$$\xi = \frac{d\Phi}{dS}$$

Pour une source ponctuelle d'énergie on définit :

Intensité énergétique \mathfrak{S} Représente le flux énergétique $d\Phi$ émis dans une direction ox couvrant un cône d'angle solide $d\Omega$

$$\mathfrak{S} = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

L'angle solique en stéradian (sd) et l'intensité énergétique en $watt.sd^{-1}$

rappel : $1sd =$ angle solide d'un cône couvrant une surface de $1m^2$ d'une sphère de rayon $1m$

Pour une source étendue on définit :

Brillance énergétique β Elle correspond au rapport de l'élément d'intensité énergétique sur l'élément de surface de la source $d\sigma$

$$\beta = \frac{d\mathfrak{S}}{d\sigma}$$

son unité est le $watt.sd^{-1}m^{-2}$

1.3. Photométrie

La photométrie est l'étude des relations existant entre les grandeurs physiques (radiométriques) caractéristiques d'un rayonnement lumineux et les grandeurs ou qualités physiologiques caractéristiques de la sensation lumineuse.

A cette fin on définit la **Luminance L** comme étant la grandeur physiologique ou photométrique permettant d'apprécier l'intensité de la lumière perçue.

De ce fait la Luminance L est liée en premier à la brillance énergétique de la source β .

1.3.1. Méthode de papillotement

Elle consiste à éclairer **ALTERNATIVEMENT** une même plage avec 2 lumières dont les brillances énergétiques sont connues et graduables.

Si $\lambda_1 \neq \lambda_2$: on parle de Photométrie hétérochrome

Dans ce cas pour une fréquence d'alternance entre les 2 sources de $6Hz$ à $10Hz$ la différence de couleur n'est plus perçue. Seule persiste la différence de sensation de Luminance d'où l'impression d'un papillotement (ou scintillement).

Finalement pour avoir l'égalité des deux Luminances $L_1 = L_2$ on fait varier les brillances respectives des 2 sources jusqu'à disparition du papillotement.

Disparition du papillotement $\Rightarrow L_1 = L_2$

On constate cependant que: $\beta_1 \neq \beta_2$.

Inversement si on égalise les brillances: $\beta_1 = \beta_2$, on constate que le papillotement persiste donc $L_1 \neq L_2$

Conclusion

La sensibilité de l'œil dépend de la longueur d'onde λ de la lumière perçue (incidente). De ce fait, certaines longueurs d'ondes sont plus efficaces donc perçues plus lumineuses que d'autres à égale brillance énergétique.

Exemples:

En vision **diurne ou photopique** l'œil est plus sensible au vert ($\lambda_V = 555 \text{ nm}$) qu'au bleu ($\lambda_B = 510 \text{ nm}$)

Dans ce cas si $L_V = L_B$ on aura alors $\beta_V < \beta_B$

Au fait en vision diurne le vert ($\lambda_V = 555 \text{ nm}$) constitue la couleur pour laquelle l'œil présente la plus grande sensibilité

En vision **nocturne ou scotopique** c'est plutôt le bleu ($\lambda_B = 510 \text{ nm}$) qui présente la plus grande sensibilité.

Coefficient d'efficacité lumineuse: On définit le coefficient d'efficacité V_λ par le rapport:

$$V_\lambda = \frac{\beta_{\lambda_M}}{\beta_\lambda} \text{ tel que } L_{\lambda_M} = L_\lambda$$

β_{λ_M} : Brillance de la lumière $\lambda_V = \lambda_M = 555 \text{ nm}$ vision diurne

β_λ : Brillance d'une lumière λ

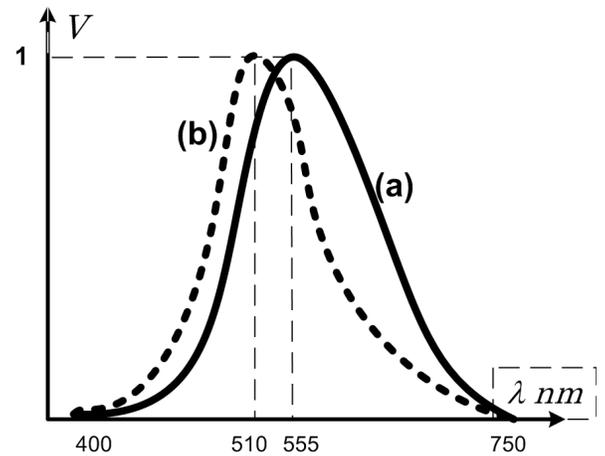
Le coefficient d'efficacité V_λ est compris entre 0 et 1

Courbe d'efficacité lumineuse: La courbe d'efficacité lumineuse correspond à la courbe de variation du coefficient de sensibilité V_λ en fonction de la longueur d'onde λ

Il y a deux courbes d'efficacité lumineuse

(a) : en vision diurne (photopique)

(b) : en vision nocturne (scotopique)



1.3.2. Relation entre grandeurs photométriques et Radiométriques

On a vu que la luminance L dépend de la brillance β et de la longueur d'onde λ

$$L_\lambda = f(\lambda, \beta) = f(V, \beta)$$

de ce fait on peut écrire :

$$L_\lambda = k \cdot V_\lambda \cdot \beta_\lambda$$

k : Cte dépendant du Système d'unité choisi

Dans le système international S.I la valeur de $k = 663$ unités photométriques pour 1 unité radiométrique pour une longueur d'onde $\lambda_M = 555 \text{ nm}$ d'où $V_\lambda = 1$

Les grandeurs photométriques sont :

Flux lumineux $F_\lambda = k \cdot V_\lambda \cdot \Phi_\lambda$: en Lumen

Eclairement lumineux $E_\lambda = k \cdot V_\lambda \cdot \xi_\lambda$: en Lux

Intensité lumineuse $I_\lambda = k \cdot V_\lambda \cdot \mathfrak{S}_\lambda$: en candela

Luminance $L_\lambda = k \cdot V_\lambda \cdot \beta_\lambda$: en nit

1.3.3. Domaines de vision : Effet PURKINJE

Effet Purkinje : La sensibilité de l'œil aux différentes longueurs d'ondes λ n'est pas la même en vision photopique qu'en vision scotopique. Cet effet permet de dégager trois domaines :

- Domaine de vision photopique (Diurne) : $L > 10nit$

Dans ce domaine la sensibilité maximale est pour $\lambda_V = 555nm$: vert-jaune. La vision est trivariante (observation des couleurs et des intensités)

- Domaine de vision scotopique (Nocturne) : $L < 10^{-3}nit$

La sensibilité maximale y est pour $\lambda_B = 510nm$ et la vision est Univariante (observation uniquement de l'intensité)

- Domaine de vision Mésotopique ou Crépusculaire : $10^{-3} < L < 10nit$

La sensibilité de l'œil aux différentes λ n'est pas stable. La sensation colorée persiste :

le blanc devient bleuté

le rouge est très diminué

1.4. Adaptation de l'œil à l'obscurité : Expérience de HECHT

Notion du Seuil Absolu L_S Le seuil absolu de luminance L_S correspond à la plus petite valeur de Luminance susceptible d'être perçue par l'œil à un instant donné.

Exemple:

En passant de la lumière du jour à l'obscurité l'œil s'adapte de mieux en mieux avec le temps pour voir les objets qui l'entourent. De ce fait, l'œil est capable d'améliorer sa vision nocturne donc de détecter des Luminances de plus en plus faibles. Ce qui conduit à diminuer la valeur L_S plus la vision dans l'obscurité est prolongée.

Expérience de HETCH On expose l'œil à un éblouissement $5000 < L < 10000 nit$ et on se propose de suivre l'évolution de L_S avec le temps depuis la mise en obscurité.

On trace la variation de $L_S = f(t)$ qui représente la «**Courbe d'Adaptation à l'obscurité**»

On considère dans cette expérience les situations suivantes :

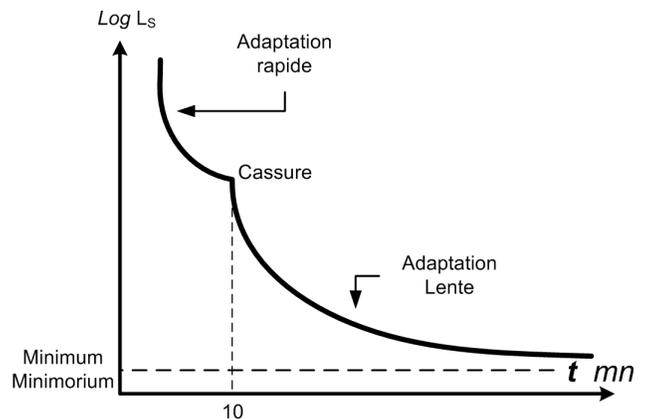
★Plages de rétine éclairées «**Larges**» et puis «**Etroites**»

- Large : Image rétinienne Fovéale + Périphérique

- Etroite : Image rétinienne sur un endroit précis de la rétine (Fovéale ou périphérique)

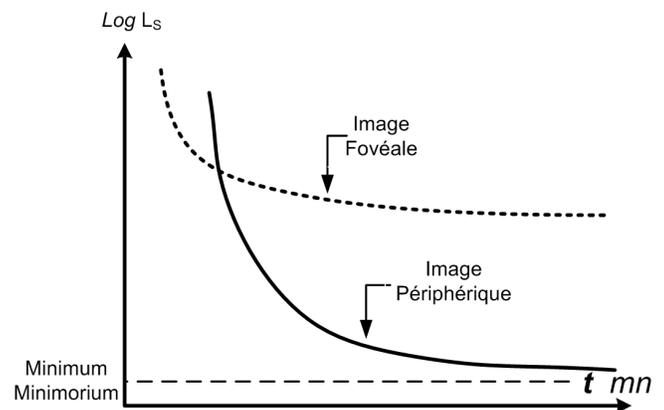
★Lumière Blanche puis Lumières Polychromatiques

1^{ère} Situation : Plage **Large** et lumière **Blanche**



Adaptation rapide suivie d'une adaptation plus lente mais prolongée. On note une cassure qui correspond au relai entre ces deux adaptations

2^{ème} Situation : Plage **Etroite** et lumière **Blanche**

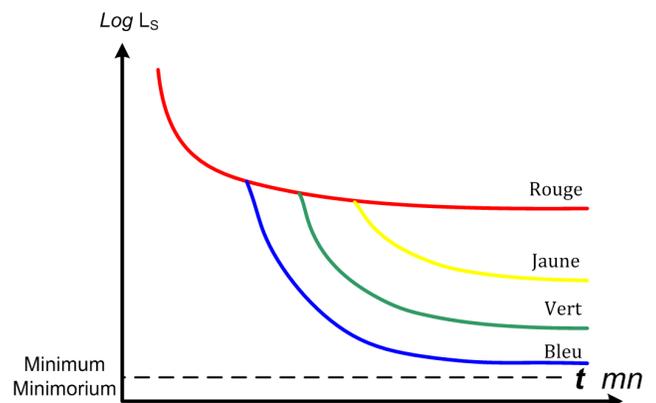


Pas de cassure mais deux courbes distinctes

- Courbe (a) : image fovéale où l'adaptation est rapide mais limitée (incomplète)

- Courbe (b) : image périphérique où l'adaptation est lente mais prolongée (complète)

3^{ème} Situation : Plage **Large** et lumières **Polychromatiques**



Pas de cassure pour le rouge

Cassures plus ou moins retardées pour les autres longueurs d'ondes

C'est la cassure du bleu qui se manifeste en premier. Pour le bleu on a les L_S les plus faibles.

Interprétation: Les cellules photoréceptrices se trouvant au niveau de la couche sensorielle de la rétine sont de deux types :

- Batonnets
- Cônes

C'est à leur niveau que s'effectue la Transduction du signal lumineux en influx nerveux.

Les Batonnets : Constituents 95% de l'ensemble des cellules photosensibles et leur nombre est d'environ 120 millions (entre 70 et 150 millions). Ils se répartissent plutôt en périphérie

Les cônes : Ne constituent que 5% de ces cellules soit de 5 à 7 millions et se situent majoritairement au niveau de la tâche fovéale

La comparaison des courbes de HETCH fait ressortir que les cônes et les batonnets ont un comportement différent du point de vue adaptation avec l'obscurité.

Au niveau de la tâche Fovéale : Correspond à l'adaptation des cônes qui est rapide mais incomplète.

Au niveau de la tâche Périphérique : Correspond à l'adaptation des batonnets qui est lente mais complète

La cassure : Relai entre l'adaptation des cônes et celles des batonnets c-à-d qu'au delà de la cassure c'est la sensibilité des batonnets qui assure l'adaptation et la vision dans l'obscurité.

En conclusion :

Suite à un fort éclaircissement suivi d'une mise en obscurité

- Les cônes sont les premières cellules sensibilisées. On note dans ce cas des seuils de luminances L_S assez élevés

- La sensibilité des batonnets prend le relai après celle des cônes et permet avec le temps d'avoir des L_S très faibles

La vision scotopique est de ce fait exclusivement due aux batonnets

Les batonnets sont tous identiques et par conséquent ils ne permettent pas de voir les couleurs \equiv **Vision Achromatique** en nuances de Gris qui est une vision de faible éclairage dépourvue de couleurs

Les cônes sont les cellules photoréceptrices qui permettent de voir les couleurs. Il existe 3 types de cônes qui représentent chacun une sensibilité à une région particulière du spectre visible de la lumière.

- Des cônes sensibles au bleu \equiv Cônes S (Short λ)
- Des cônes sensibles au vert \equiv Cônes M (Medium λ)
- Des cônes sensibles au rouge \equiv Cônes L (Large λ)

1.5. Photochimie de la rétine

La couleur pourpre de la rétine est due à un seul pigment rétinien (celui des bâtonnets). Exposée à la lumière la rétine jaunit puis blanchit ce qui prouve qu'elle est le siège d'une réaction Photochimique.

Il existe 4 types de Chromoprotéines dans la rétine

Chromoprotéines \equiv opsines (opsin \equiv vision)

Dont 1 au niveau des bâtonnets qui s'appelle Rhodopsine. Trois (3) autres au niveau des cônes d'où les trois (3) types de cônes.

Erythrolabe \equiv rétinol + Erythroopsine (575nm : cônes L)

Chlorolabe \equiv rétinol + Chloropsine (535nm : cônes M)

Cyanolabe \equiv rétinol + Cyanopsine (440nm : cônes S)

Le rétinol est un dérivé de la vitamine A (groupe prosthétique) ce qui explique qu'une carence en vitamine A diminue la sensibilité des cônes et beaucoup plus celle des bâtonnets

1.6. Dyschromatopsies : Anomalies de la vision des couleurs

1.6.1. Introduction

Les dyschromatopsies ou troubles de la vision des couleurs sont d'origine héréditaires (sexe). On distingue plusieurs types dont :

- Achromates ou Monochromates (normaux ou anormaux)
- Dichromates ou Daltoniens
- Trichromates Anormaux

1.6.2. Achromatopsie ou Monochromatopsie

Achromatopsie est dite Normale

Les cônes ne sont pas fonctionnels et ne répondent pas. La vision s'appuie seulement sur les bâtonnets. Il en résulte une vision dépourvue de couleurs (Scotopique) caractérisée par une faible acuité visuelle.

Achromatopsie est dite Anormale

Les cônes répondent assez bien, l'acuité visuelle est conservée mais de dysfonctionnement se situe au niveau des voies nerveuses

1.6.3. Dichromatopsie

Vision bivariante qui s'articule seulement sur deux couleurs primaires. Le triangle des couleurs se réduit à une droite joignant les deux couleurs primaires.

- Toutes les teintes observées sont spectrales et la désaturation n'existe plus

Selon le pigment manquant on observe trois types de Dichromatopsies

- Protanopies : Aveugles au rouge (Erythrolabes manquants)

- Deutéranopies : Aveugles au vert (Chrolabes manquants)
- Tritanopies : Aveugles au bleu (cyanolabes manquants)

1.6.4. Trichromatopsie Anormale

Vision trivariante avec la présence de trois primaires et peut donc ressentir n'importe quelle sensation visuelle. Les trois primaires sont cependant utilisées à des proportions différentes des personnes normales (Trichromates normaux). On distingue trois types :

- La Protanomalie : Excès de sensation au rouge
- La Deutéranomalie : Excès e sensation au vert
- La Tritanomalie : Excès de sensation au bleu