

OPTIQUE

BIOPHYSIQUE DE LA VISION

Un grand nombre de schémas ont été repris de l'ouvrage :

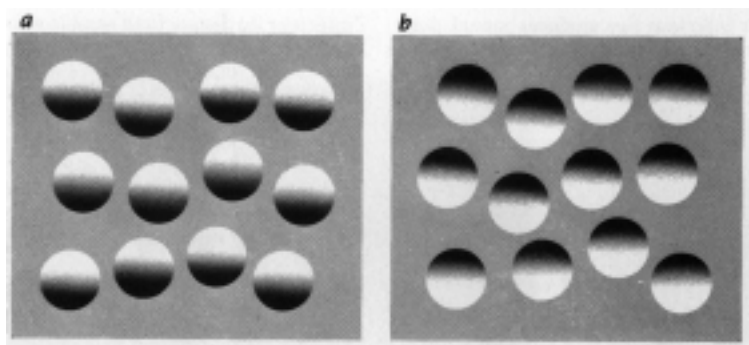
Les mécanismes de la vision. Bibliothèque Pour La Science. Diffusion BELIN 1990

INTRODUCTION

La vision est un moyen d'interaction privilégié avec le monde extérieur car la représentation de l'espace qui en résulte va permettre la plupart des interactions entre cet espace et soi grâce à :

- la connaissance des déplacements des autres éléments
- l'information
 - immédiate, cf. vitesse de la lumière
 - a priori : la lumière vient d'en haut (figure ci-dessous)

La représentation de sphères posées sur un plan fait penser à des objets bombant au dessus du plan en a et à des sphères en creux dans le cas b.



- la reconnaissance des formes (ex. visages)
- la programmation et la gestion de l'action (ex: conduite d'un véhicule).

La chaîne visuelle comporte les éléments suivants :

- l'œil
- recueil du message
- transduction
- la transmission nerveuse
- l'analyse et le traitement
- image en couleur et en relief
(représentation de l'extérieur)

Nous allons essayer d'analyser l'aspect physique de cette chaîne et comment le cerveau procède pour établir cette représentation par un codage particulier.

Nous verrons également, sur quelques cas, comment l'oeil normal peut être en situation d'indécision (le dalmatien, ci-dessous) ou de surinterprétation.



Cette représentation (image) est un moyen d'expression privilégié depuis les débuts de l'humanité (peinture rupestre) jusqu'aujourd'hui, même si cette représentation de l'objet a perdu de son sens (Gelb-Rot-Blau, 1925, de V. Kandinsky, ci-dessous).



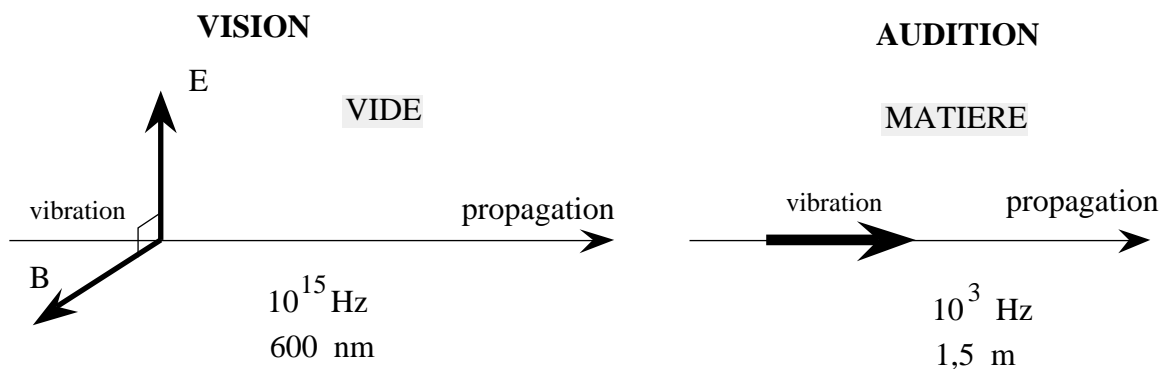
Dans la communication, seul restait à banaliser le transit de la vision, c'est chose faite avec l'audiovisuel ou l'ordinateur multi-média.

1. AVANT LE RECUEIL : LA LUMIERE, SIGNAL PHYSIQUE

1.1. L'onde électro-magnétique - rappels

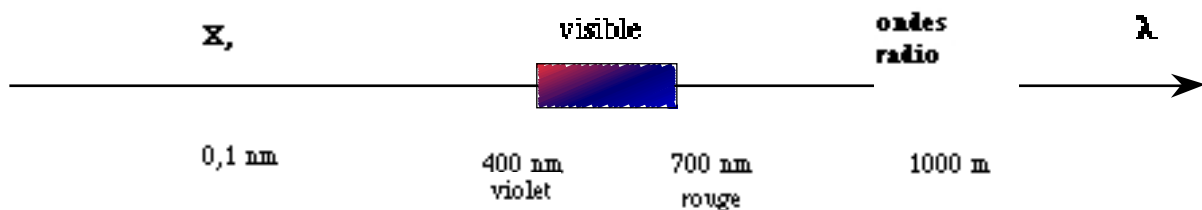
(voir détails dans le cours du premier semestre)

Le véhicule du message visuel, c'est l'onde électro-magnétique (OEM). Il s'agit d'une vibration électrique et magnétique se propageant en ligne droite dans le vide avec une vitesse constante ($c = 3.10^8$ m/s).



E et B sont dans un plan perpendiculaire à la propagation.

Les OEM présentent un spectre continu depuis $\lambda = 10^{-15}$ à 10^3 m et la partie à laquelle nous accédons par nos sens est très petite : 0,4 à 0,7 μ , soit 400 à 700 nm. Dans cette partie du spectre, la vision va représenter les différentes fréquences par un codage particulier : la couleur.



Dès le début de l'optique physique, la lumière a été décrite comme présentant un aspect ondulatoire, les expériences le démontrant abondamment (Ex : les interférences) jusqu'au jour où EINSTEIN a démontré expérimentalement que la lumière était corpusculaire (effet photoélectrique 1905). Alors, il a fallu se rendre à l'évidence, la lumière était les deux à la fois, ou bien tantôt l'une et tantôt l'autre. Cette unification est l'oeuvre d'un physicien français Louis de BROGLIE.

Pour mettre tout le monde d'accord, on a estimé la masse de ce grain élémentaire de lumière : zéro. Chaque photon a une masse nulle au repos, c'est-à-dire que la lumière arrêtée n'a aucun sens et qu'elle n'existe qu'à partir du moment où elle se propage. La lumière peut être décrite par paquets, quanta, chaque quantum présentant une énergie élémentaire :

$$W = h$$

h étant la constante de Planck.

Nous reviendrons sur ces points :

- avec les lois de l'optique géométrique, nous considérerons la lumière comme une onde (qui suit un trajet rectiligne dans un milieu),
- et lors de l'évocation du seuil de détection de l'oeil ou de la transduction, la lumière sera considérée de manière quantique.

1.2. Unités radiométriques

Rappelons les grandeurs caractéristiques d'un rayonnement pris isolément.

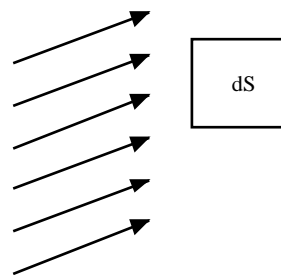
$c = 3.10^5$ km/s : vitesse de propagation dans le vide (3.10^8 m/s)

λ : longueur d'onde (m) (longueur parcourue au bout de laquelle la vibration se retrouve dans le même état)

ν : fréquence (Hz) (nombre de vibrations par unité de temps)

$$= c/\lambda$$

Pour le rayonnement total (toutes les longueurs d'ondes comprises dans une mesure), est la quantité d'énergie transportée par seconde (W) (flux énergétique), par unité de surface du milieu dans lequel l'onde se propage, on parle d'éclairement énergétique :

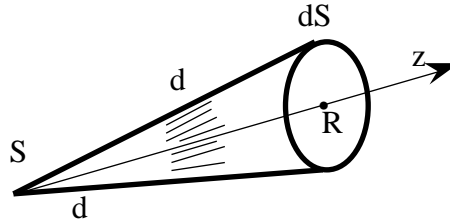


$$E = \frac{d}{dS} \quad \text{en } W.m^{-2}$$

C'est une puissance surfacique ou radiance.

Pour une source ponctuelle, on peut définir l'intensité énergétique :

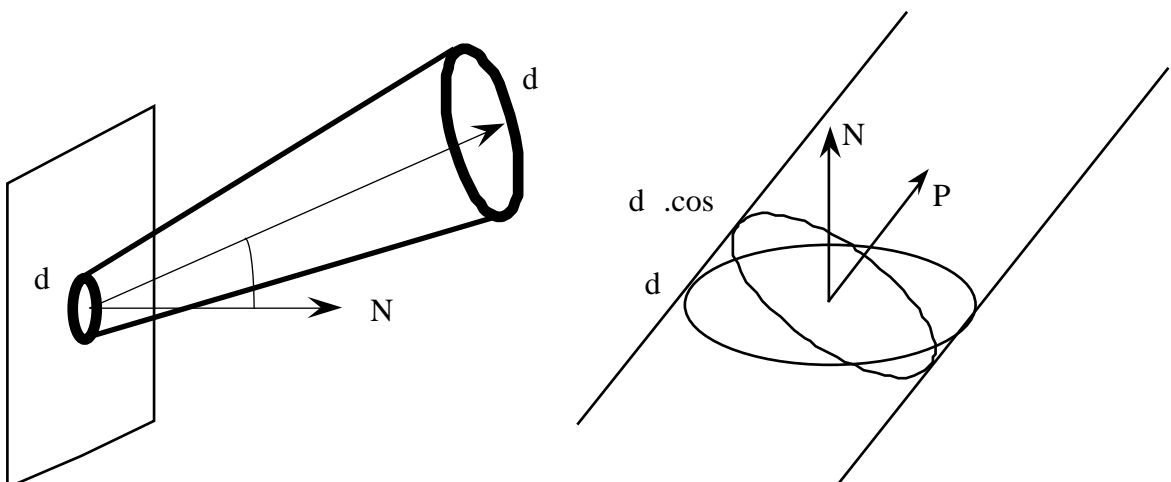
$$I = \frac{dP}{d\Omega} \quad \text{dans une direction, } z, \text{ donnée en } \text{W.stéradian}^{-1} \text{ (W.sd}^{-1}\text{)}$$



Puisque la lumière se propage en ligne droite à partir de la source, on remarque que cette quantité se conserve quelle que soit la distance à la source mais pas l'éclairement énergétique par rapport à cette même source.

Si la source n'est pas ponctuelle, mais de surface, on rapporte l'intensité énergétique à l'unité de surface de la source : on parle de brillance énergétique, B. Dans une direction, par élément de surface d'émission, on peut calculer l'énergie envoyée par unité de temps, d^2P , en fonction de la brillance de l'objet (ou luminance énergétique).

$$B = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{d^2P}{dS \cos \theta} \quad \text{W.m}^{-2}\text{.sd}^{-1}$$



$d \cos \theta$: surface de l'élément de source présentée perpendiculairement à la direction

de propagation à 90° : $dI = 0$.

Il ne faut pas confondre brillance physique (propriétés de l'objet émettant) et sensation de "brillance" (quantité de lumière reçue par le récepteur, l'œil) qui est fonction de l'intensité énergétique, soit :

$$dI = B \, d \, \cos$$

On constate bien que la quantité reçue tend vers 0 quand $= 90^\circ$, la brillance restant inchangée.

Ces grandeurs s'appliquent dans le cas de sources polychromatiques ou monochromatiques. Dans le premier cas, on peut s'intéresser à des bandes de fréquence, on fera donc appel à des grandeurs dérivées par rapport à la longueur d'onde, permettant de préciser l'énergie transportée par bandes de fréquence. Soit :

Flux énergétique	→	$= \frac{d}{d}$	$W.m^{-1}$
Intensité énergétique	→	$I = \frac{dI}{d}$	$W.sd^{-1}.m^{-1}$
Eclairement énergétique	→	$E = \frac{dE}{d}$	$W.m^{-3} (W . m^{-2} . m^{-1})$ [surface]
Brillance énergétique	→	$B = \frac{dB}{d}$	$W.m^{-3}.sd^{-1}$

1.3. L'image lumineuse

L'image est une représentation plane de l'espace telle qu'à un point de l'espace correspond un seul point de l'image.

Mathématiquement, la projection d'un espace de 3D sur un plan (2D) ne permet pas cette unicité. Elle sera néanmoins respectée par :

- des limitations : on ne voit pas les faces "cachées"
- une modulation du message sensoriel selon l'éclairement (ombrage : onde directe ou vue par réflexion) et d'autres paramètres : texture, tonalité...

2. LE MESSAGE SENSORIEL ET SES PARAMETRES

2. 1. La trivariance visuelle

Toute sensation lumineuse peut être entièrement caractérisée par 3 variables indépendantes définies soit physiologiquement, soit physiquement.

2. 2. Variables physiologiquement perçues par le sujet :

1. La luminance : intensité L de la lumière perçue (mesurable). Le sujet exprime ce paramètre en disant que la source est intense ou faible, l'objet clair ou foncé.
2. Latonalité : le sujet indique la teinte de la lumière perçue, grandeur repérable, mais pas mesurable, par un λ qui produit la même sensation.
3. La saturation : reliée au pourcentage de lumière blanche qui s'ajoute à une teinte donnée (délavé). Ex : bleu ciel moins saturé que bleu roi
rose pâle contient plus de blanc qu'un rouge foncé.

La luminance peut exister indépendamment des deux autres. Ex : vision crépusculaire, sans couleur.

Donc, une sensation lumineuse sera la superposition d'une quantité donnée (luminance), d'une lumière de λ donnée et d'une quantité de lumière blanche.

$$L = L_{\lambda} + L_W = f(L_{\lambda}, \lambda, L_W)$$

La saturation est donnée par le facteur de pureté :

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

$p = 0$ blanc

$p = 1$ couleur spectrale monochromatique, dite saturée ou pure.

Le mode de représentation trivariante est dit système monochromatique (une seule dominante intervient), qui, d'ailleurs, tend à lier saturation et tonalité. Mis à part le facteur de pureté, cette définition présente un biais puisque L_W contient, entre autres,

et une luminance L .

2. 3. Variables physiques mesurables par un sujet

Une sensation lumineuse peut être reproduite par la superposition en proportions variables de 3 teintes primaires : rouge, vert, bleu.

La sensation est définie par la luminance de chaque source colorée :

3 variables mesurables physiquement par la brillance.

$$L = L_R + L_B + L_V$$

L_R : luminance rouge L_B : luminance bleue L_V : luminance verte

Mode de représentation trivariante système trichrome

2. 4. Instruments d'étude des luminances et autres paramètres :

Il faut produire de la lumière blanche et colorée. La plus difficile à faire est la lumière blanche.

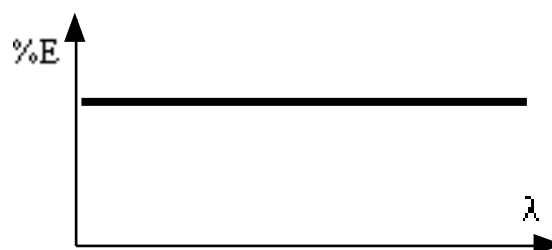
2.4.1. Couleur

On peut utiliser :

- des filtres colorés dans la masse, ceux-ci sont plus ou moins monochromatiques,
- des raies d'excitation atomique, ex. Na en jaune (moyen d'analyse des ions),
- des faisceaux laser : lumière monochromatique et cohérente, ex. rubis en rouge.

2.4.2 Production du blanc

Sur un plan physique, idéal, le blanc est obtenu par la représentation de toutes les couleurs en répartition énergétique constante, donc :

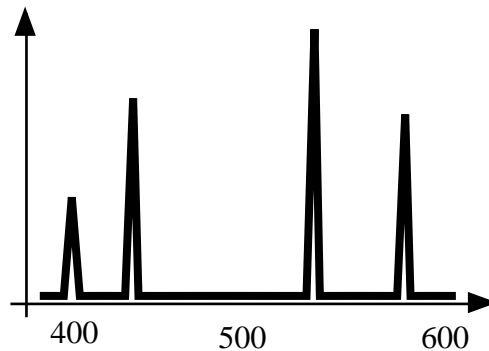


1- Il n'existe pas

2- On travaille avec des instruments plus ou moins approximatifs, même s'ils s'avèrent efficaces à l'usage

3- On évitera les sources présentant des spectres de raies

(ex : lampe à vapeurs de mercure blanc par composition de 4 raies, on peut imaginer l'effet d'un filtre qui arrêterait les hautes, ou les basses, longueurs d'onde.)



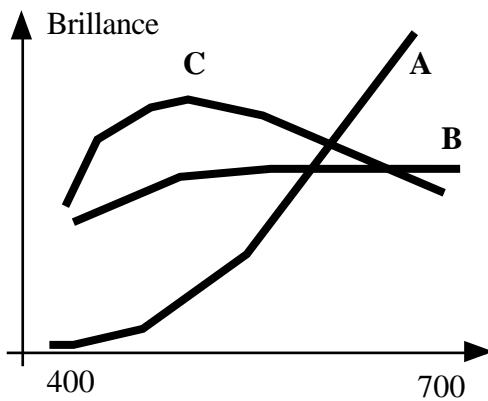
Devant la complexité de ce problème, une lumière blanche étalon a été déterminée par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) Blancs étalons :

A : filament de tungstène dont la température de couleur est 2848° (pied ascendant dans la loi de Planck sur la brillance énergétique)

Pour arriver au blanc, on ajoute deux types de filtres, soit B, soit C :

B : spectre obtenu en faisant passer le blanc étalon A à travers un filtre (température de couleur = 4800° K soleil)

C : autre filtre (température de couleur = 6500° K). Les spectres de brillance deviennent :



3. ANALYSE DU MESSAGE SENSORIEL A PARTIR DE 3 QUALITES PHYSIOLOGIQUES

3.1. Notion de luminance et analyse psychophysique

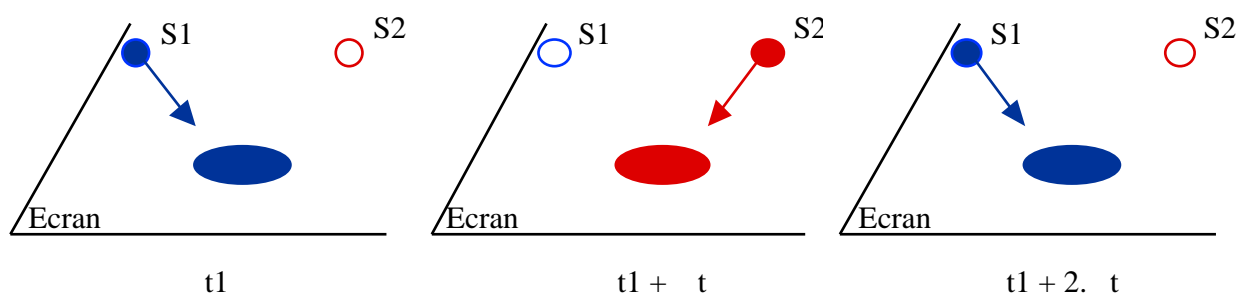
La luminance est la sensation qui relie la lumière à une intensité plus ou moins forte (déjà vu plus haut).

3.1.1. Introduction d'une "mesure" de la luminance (sensation)

Cette sensation est liée principalement à l'éclairement énergétique de la rétine (flux énergétique par unité de surface de la rétine). En négligeant les variations du diamètre pupillaire et en supposant constante la direction œil-objet, cet éclairement est proportionnel à la brillance énergétique de la source lumineuse. Toutefois, la luminance ne peut pas être mesurée par la brillance énergétique en raison de l'influence de la longueur d'onde qui se traduit par la sensation de couleur (voir plus loin) :

- l'égalité de luminance est difficile à affirmer pour la sensation de deux couleurs différentes
- l'égalité des luminances ne correspond pas nécessairement à l'égalité des brillances énergétiques.

Comment établir l'égalité de deux sensations de luminance de deux couleurs différentes ? Cette sensation est immédiate pour deux couleurs identiques. La sensation de couleur est éliminée par le phénomène de papillotement : la même plage est éclairée alternativement avec deux lumières de brillance énergétique connue et modulable. A une fréquence de 6 à 10 Hz, l'œil perçoit encore les différences de luminance et pas celles de couleur.



La disparition de la sensation de papillotement définit la notion d'égalité des luminances.

Cependant, cette égalité physiologique ne se répercute pas sur les grandeurs physiques (les brillances énergétiques). En effet, la sensibilité de l'oeil dépend de la longueur d'onde : l'oeil est plus sensible au bleu qu'au rouge mais avec un maximum pour $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ en vision diurne (dite photopique) qui concerne les cônes.

Donc, la luminance est égale au produit du facteur

- de sensibilité de l'oeil, soit v
- de brillance énergétique, B

$$L = v \cdot B$$

Or, le facteur v est difficile à déterminer de façon absolue mais plus facile de façon relative, soit $V = f(\lambda)$ donc

$$L = k \cdot V \cdot B$$

Il existe un maximum pour v , donc une λ_m pour laquelle $V(\lambda_m) = 1$. On a alors :

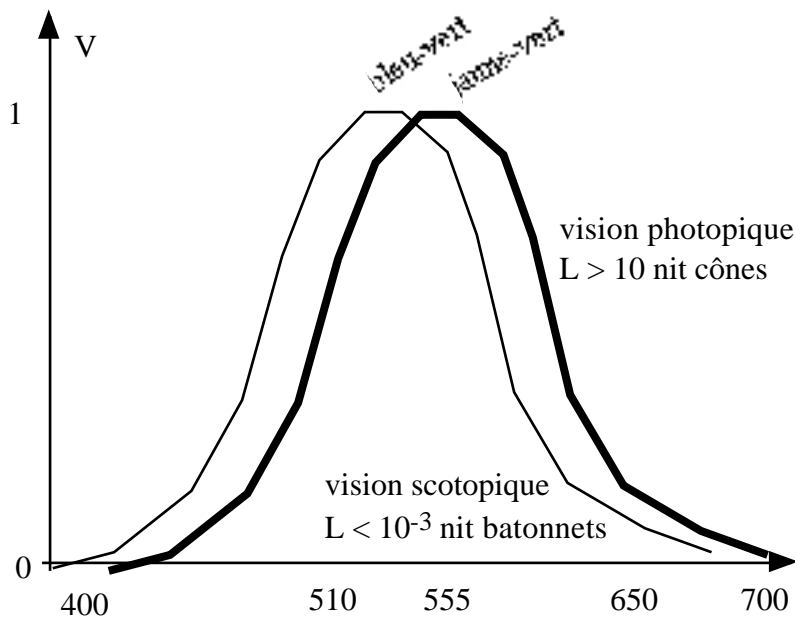
$$L_m = k \cdot 1 \cdot B_m$$

Pour toutes les autres λ , $0 < V < 1$, pour que les sensations de luminances soient identiques, soit : $L = L_m$, il est nécessaire que :

$$k \cdot B = k \cdot V \cdot B_m \text{ donc } B > B_m$$

Pour produire la même luminance, il faut une brillance énergétique minimale à la λ_m de sensibilité maximale.

Le coefficient d'efficacité lumineuse est considéré comme indépendant de B , en première approximation, pour les B pas trop faibles. On peut en tracer la variation en fonction de la longueur d'onde :



Chaque courbe traduit le fonctionnement d'un type de récepteur rétinien (ex : les bâtonnets sont insensibles au rouge). L'aspect global est celui d'une courbe de Gauss retraçant la probabilité de détection en fonction de λ (voir transduction).

Puisque les V_m sont différents en vision photopique et scotopique, on choisit une V_m définie par convention pour l'étude "globale" de la vision, indépendamment des constituants de l'œil. On a ainsi :

$$L = k.V .B$$

k dépend des unités choisies, V est donné par la courbe d'efficacité scotopique.

Ce qui vient d'être exposé dans le cas des lumières monochromatiques peut être étendu. Dans le cas de lumières polychromatiques, la luminance est égale à la somme des luminances de ses composantes (Lois d'Abney).

La luminance est donc une grandeur physique mesurable à partir du moment où k peut être estimé, ainsi que $V(\lambda)$, pour une population moyenne.

3.1.2. Unités photométriques

L'ancienne unité était appelée "bougie".

La nouvelle unité est la candela : intensité lumineuse I , dans une direction déterminée, d'une ouverture perpendiculaire à cette direction, ayant une aire de $1/60 \text{ cm}^2$ et rayonnant comme un radiateur intégral à la température de solidification du platine (2028°K). C'est une quantité de flux lumineux par unité d'angle solide.

Les autres unités photométriques s'en déduisent :

- le flux lumineux F : lumen ou candéla.stéradian, quantité de lm / s
- l'éclairement lumineux E : lux ou lumen par m^2
- la luminance $L = dI/d\Omega \cdot \cos \theta$: nit ou candela par m^2
 $1 \text{ cd.m}^{-2} = 10 \text{ nit}$

Dans le système international, $\lambda = 555 \text{ nm}$ ($V = 1$), $k = 683 \text{ lumens/watt}$.

Grandeurs radiométriques

Unité physique quantifiable
 Définitions absolues
 Système International

Grandeurs photométriques

Sensation = $k \cdot V \cdot \text{Physique}$
 Unité de "sensation"
 Définitions orientées vers un récepteur l'oeil
 à partir d'unités usuelles

Flux énergétique	Watt	Flux lumineux	F lumen
Intensité énergétique	$I = \frac{dP}{d\Omega} \text{ W.sr}^{-1}$	Intensité lumineuse	$I = \frac{dF}{d\Omega} \text{ candela}$
Eclairement énergétique	$E = \frac{dP}{dS} \text{ W.m}^{-2}$	Eclairement lumineux	$E = \frac{dF}{dS} \text{ lux}$
Brillance énergétique	$B = \frac{d^2P}{d\Omega dS \cos \theta} \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$	Luminance	$L = \frac{d^2F}{d\Omega dS \cos \theta} \text{ nit}$ $1 \text{ cd.m}^{-2} = 10 \text{ nit}$

3.1.3. Phénomène de Purkinje (1825)

Les deux courbes d'efficacité lumineuse correspondent à deux types de récepteurs rétiniens qui permettent de décrire les trois domaines de la vision en fonction du niveau de luminance.

diurne / crépusculaire / nocturne

Domaine de la vision diurne (ou photopique)

L 10 nits

La sensation de couleur existe.

Le système d'unités photométriques correspond aux sensations du sujet (égalité de luminance = égalité des sensations lumineuses)

Domaine de la vision nocturne (ou scotopique)

Luminance $L < 10^{-3}$ nits

Vision non colorée (due aux bâtonnets)

L au-dessous du seuil de détection des cônes.

Le système d'unités photométriques ne correspond plus aux sensations du sujet.

Ex : Deux couleurs (bleu et rouge) qui ont la même luminance en vision photopique sont diminuées dans le même rapport de brillance pour se placer en vision scotopique : le bleu semble plus lumineux que le rouge et paraît presque noir : c'est "l'effet Purkinje".

Il serait apparemment nécessaire de définir un autre système d'unités photométriques.

Physiologiquement, il s'agit d'un effet de sensibilité relative lié au changement de récepteur cône / bâtonnet.



Illustration du phénomène de Purkinje sur un exemple :

En vision photopique, un sujet perçoit une égalité de luminance pour une source rouge, R, et une source bleue, B, de brillances B_R et B_B . On a donc :

$$L_{R,P} = L_{B,P}$$

soit pour les cônes $k \cdot V_{R,C} \cdot B_R = k \cdot V_{B,C} \cdot B_B$

si on admet, pour clarifier sur une application numérique, que :

$$V_{R,C} = 0,5 \text{ et } V_{B,C} = 0,4$$

on a des brillances dans le rapport :

$$B_R / B_B = 4/5.$$

En voulant étendre ce résultat à la vision scotopique, on baisse l'intensité lumineuse des sources en jouant sur leurs brillances ; celles-ci étant abaissées d'un facteur 10000 par exemple. Le rapport des brillances reste inchangé mais les sensibilités relatives changent puisque les récepteurs actifs changent : $V_{R,C}$ devient $v_{R,B}$ et $V_{B,C}$ devient $v_{B,B}$. Admettons que les valeurs de sensibilité relatives sont devenues 0,2 pour le rouge et 0,8 pour le bleu. Le rapport des luminances est alors devenu :

$$L_R / L_B = V_{R,B} \cdot B'_R / V_{B,B} \cdot B'_B = (0,2 \cdot 4 \cdot 10^{-4}) / (0,8 \cdot 5 \cdot 10^{-4}) = 1/5.$$

Domaine intermédiaire de la vision crépusculaire

La sensation colorée persiste mais atténuée les rouges.

La courbe d'efficacité lumineuse se déplace progressivement vers les courtes longueurs d'onde (bleu) cinéma : impression de nuit par filtre bleu.

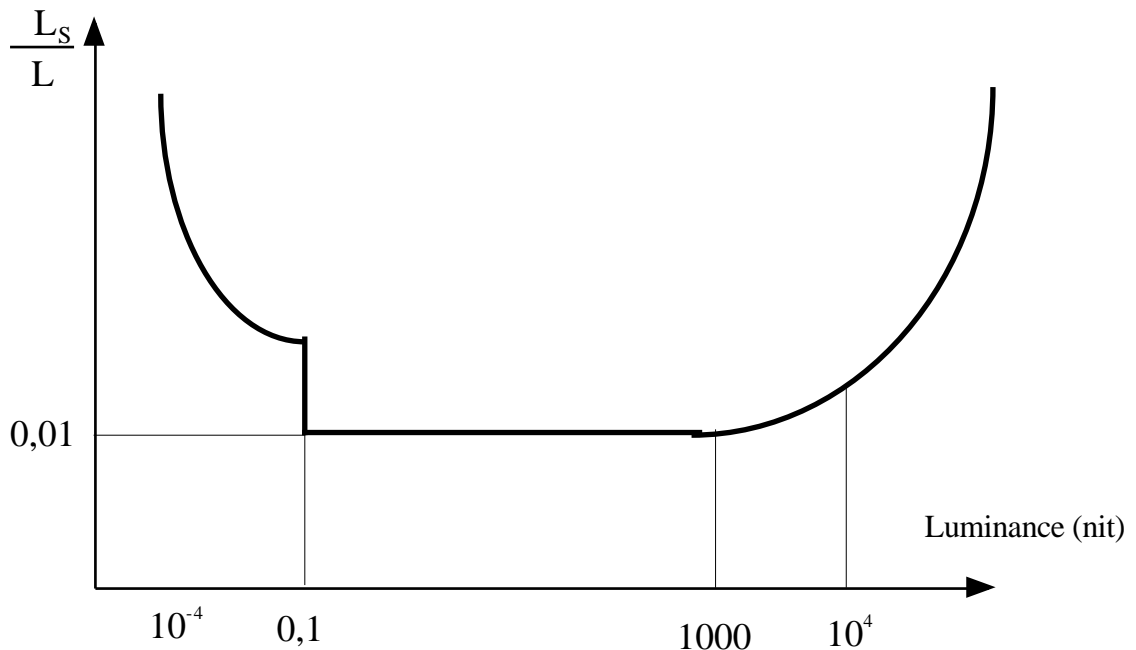
3.1.4. Seuil différentiel de luminance

C'est la variation minimum de luminance (L_{seuil}) pour permettre de discerner une luminance donnée (L) de sa voisine ($L + \Delta L$).

Donc, dans un photomètre à plaques juxtaposées, un sujet qui observe les luminances L et $L + \Delta L$ voit disparaître le papillotement quand ΔL diminue jusqu'à la valeur L_{seuil} .

On utilise le plus souvent la notion de seuil différentiel relatif qui est un seuil de contraste ; soit L_{seuil}/L .

La variation de ce seuil différentiel relatif en fonction de la luminance est appelée loi de Bouguer-Masson



On constate :

- que ce seuil différentiel relatif est à peu près constant (0,01) dans un large domaine de luminance : 5 ordres de grandeur
- qu'il existe une cassure aux faibles luminances qui traduit la dualité des récepteurs (cônes et bâtonnets).

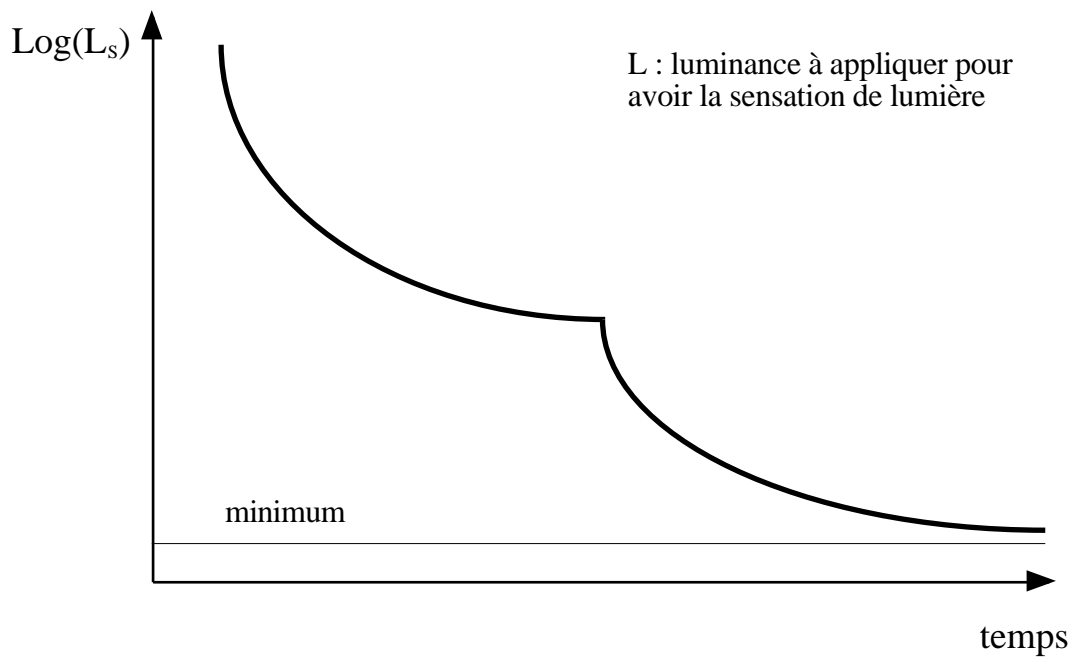
3.1.5. Seuil absolu et adaptation au niveau de luminance

Le seuil absolu serait défini comme la plus petite luminance susceptible d'être perçue par l'oeil.

Or, l'expérience de tous les jours montre l'importance de l'histoire immédiate des phénomènes visuels : sur une route en été, on ne voit rien à l'entrée d'un tunnel et, au contraire, on est ébloui en sortant du tunnel si celui-ci est assez long : le seuil absolu a varié en fonction du temps (qui est lié à l'éclairement).

On peut étudier la variation du seuil absolu, soit la luminance L à appliquer pour déclencher une sensation, en fonction du temps passé dans l'obscurité après avoir exposé l'oeil à une forte luminance.

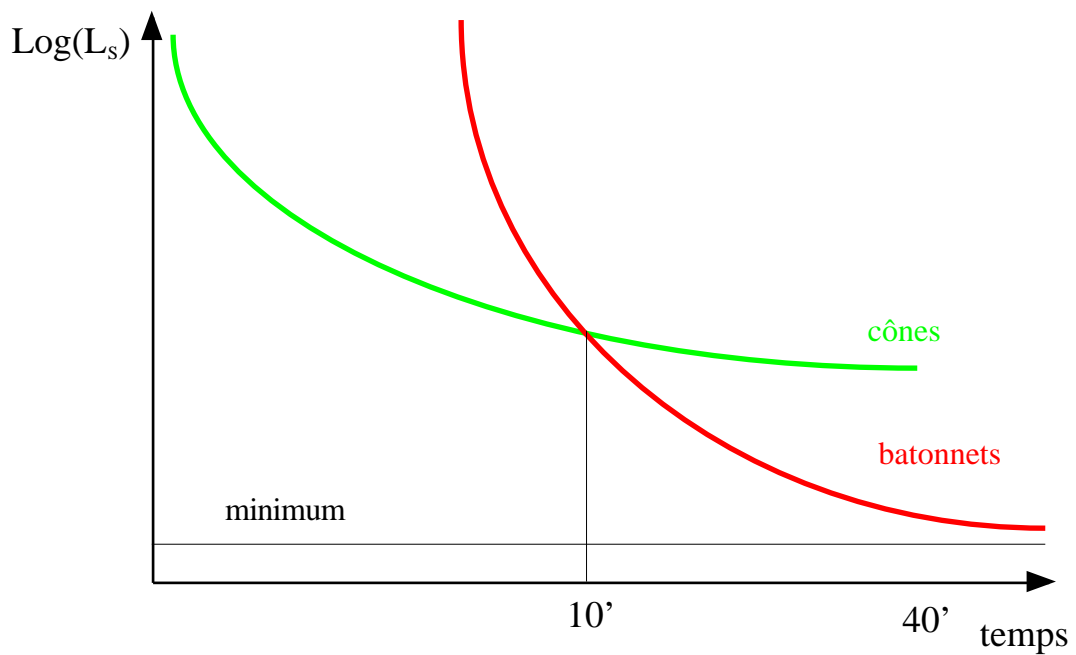
On constate le phénomène d'adaptation suivant avec exposition à une lumière blanche en source étendue :



Il s'agit d'une courbe biphasique qui est explicable par la somme de deux phénomènes : les réponses d'adaptation

- des cônes
- des bâtonnets

qui peuvent être séparées si l'on utilise un faisceau lumineux fin.

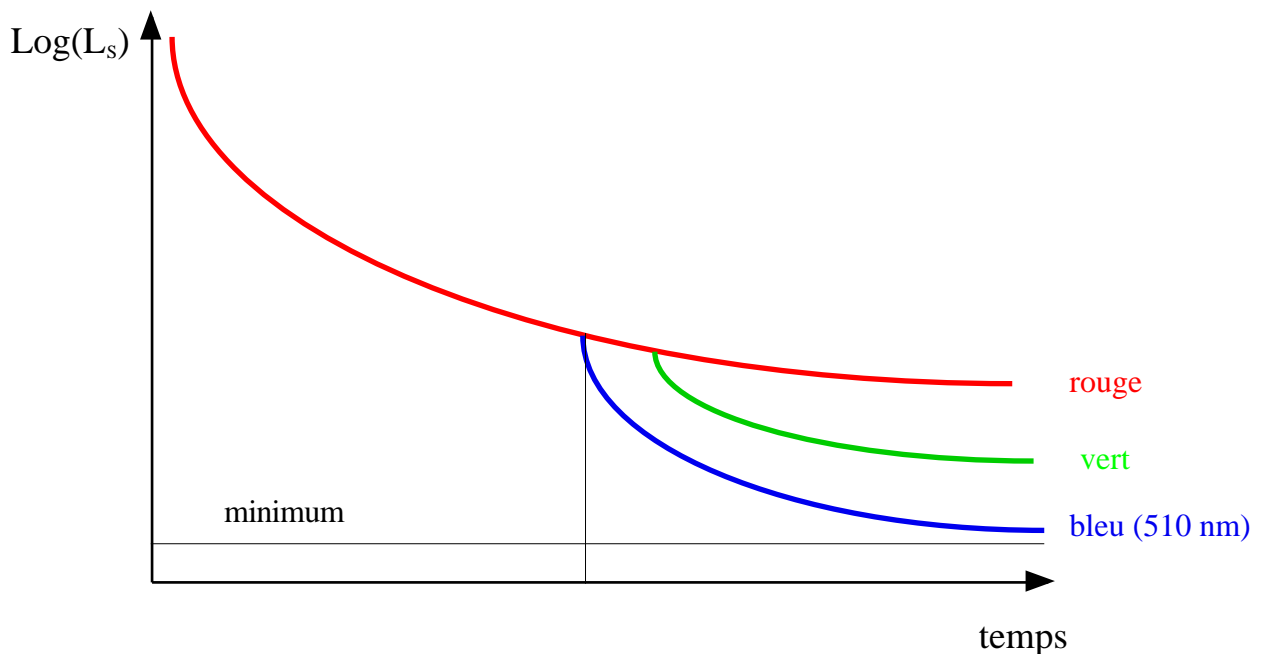


Pour les cônes, l'adaptation est rapide et correspond à une vision centrale ; elle

intervient tant que l'exposition à l'obscurité est inférieure à 15 minutes.

L'adaptation des bâtonnets est plus lente, elle correspond à une vision périphérique. Après 15 minutes, la vision provient donc davantage des bâtonnets qui sont les plus sensibles. Si la longueur d'onde d'éclairement est dans le bleu vert (510 nm), on atteint alors un seuil absolu minimum (cf. courbes de sensibilité relative des récepteurs).

Donc, dans un éclairement sur une plage étendue et en lumière monochrome, la courbe va varier selon les longueurs d'onde puisque les sensibilités des récepteurs varient :

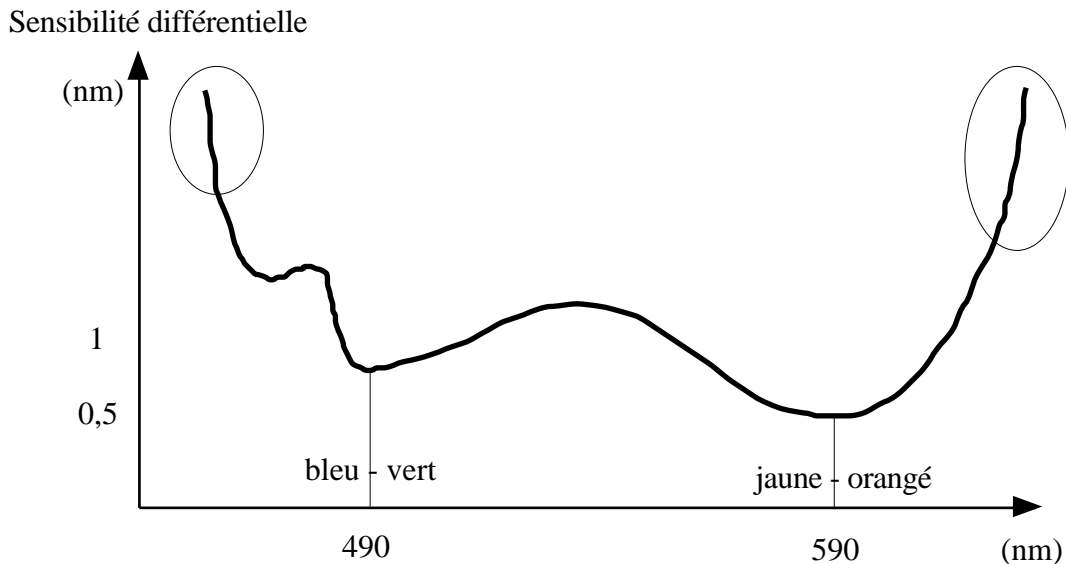


3.2. La couleur

3.2.1. Sensibilité de l'oeil à la couleur

La dispersion de la lumière blanche par un prisme permet de mettre en évidence le lien entre couleur et longueur d'onde (Newton 1672).

De la même façon que nous venons de définir un seuil différentiel de luminance, on peut mesurer la capacité à discerner les couleurs différentes (donc un ΔL) en fonction de la couleur. Soit $\Delta L = f(\lambda)$.



Attention : c'est un graphe de sensibilité différentielle () et pas sensibilité différentielle relative (/).

On constate donc qu'il est plus facile de différencier des couleurs dans la zone du bleu à l'orange que des violets ou des rouges (zones dans les ellipses en trait fin). L'oeil peut discriminer environ 150 tonalités (à luminance et saturation constantes).

Il existe néanmoins d'autres couleurs (ou tonalités) que celles de l'arc-en-ciel et que l'oeil peut toutefois distinguer, par exemple :

- rose (rouge + blanc)
- pourpre (superposition rouge + violet)
- brun (orange de faible luminance)
- gris (blancs de faible luminance)

En fait, le cerveau va interpréter ces couleurs liées aux faibles luminances en fonction de l'environnement.

3.2.2. Couleurs désaturées

Un rose provoque une sensation de couleur identique à celle provoquée par la superposition d'un rouge et d'une lumière blanche, soit en termes de luminance :

$$L = L + L_W \quad (\text{équation colorimétrique fondamentale})$$

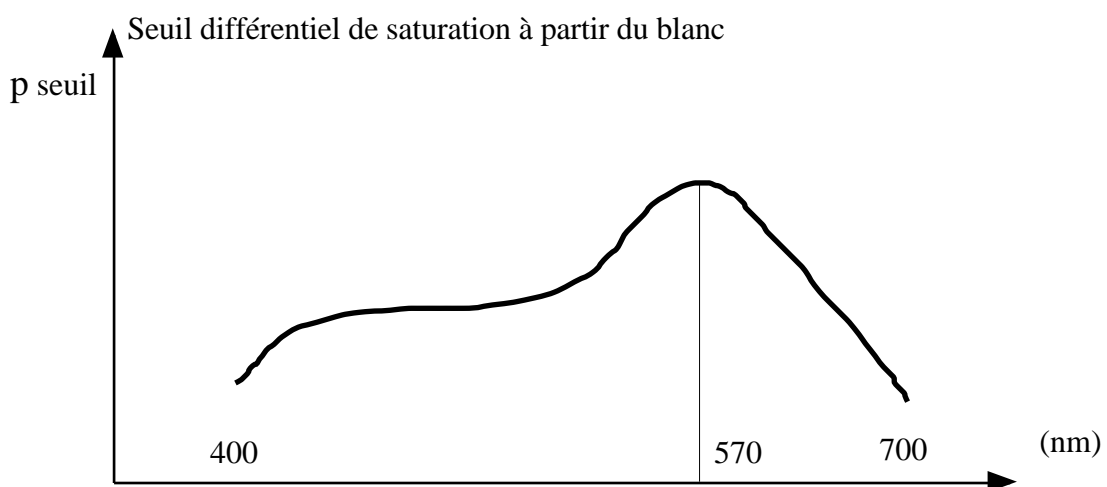
L : luminance de la sensation

On rappelle que $p = L / L$ est appelé facteur de pureté

et que $p = 0$ lumière blanche

$p = 1$ couleur spectrale

Selon la longueur d'onde, l'oeil est plus ou moins sensible à la saturation : ainsi, une faible luminance de violet ajoutée à du blanc (lilas) permet de signaler la présence de cette longueur d'onde. Il faut ajouter 50 fois plus de jaune pour pouvoir distinguer le jaune désaturé du blanc.



3.2.3. Pourpres et complémentarité des couleurs

La sensation qui résulte de la superposition de 2 couleurs de longueurs d'onde λ_1 et λ_2 dépend de l'écart $\lambda_2 - \lambda_1$.

- Si, pour un L_1 / L_2 convenable, la sensation résultante est une couleur blanche, les couleurs sont dites complémentaires.

- Si, pour un écart $\lambda_2 - \lambda_1$ inférieur à celui d'un couple de complémentaires, la tonalité est celle d'une couleur spectrale de longueur d'onde λ , avec $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$ est alors appelée longueur d'onde dominante de la sensation colorée. On a alors :

$$L_1 + L_2 = L + L_W$$

- Pour un écart supérieur à celui des complémentaires, la tonalité obtenue est pourpre. Il y a plusieurs longueurs d'onde possibles, on parle donc des pourpres. Par expérience, les verts sont les complémentaires des pourpres (c'est-à-dire que vert +

pourpre = blanc), on peut donc caractériser chaque tonalité pourpre par sa longueur d'onde complémentaire mais pas par sa dominante. Une explication sera fournie par l'étude du triangle de Maxwell.

3.3. Lois de Grassman

3.3.1. Notion de “mesure” d'une sensation lumineuse

S'il y a une “mesure” pour une grandeur, il existe des “lois” qui la régissent. Ecrire l'équation colorimétrique fondamentale $L = L_1 + L_2$ traduit l'égalité et l'addition des luminances (élément de flux lumineux par unité de surface normale à la direction de la lumière) ; elle sous-entend donc l'égalité et l'addition de deux sensations lumineuses.

On a pu définir l'égalité de deux sensations lumineuses par leur caractère indiscernable par l'oeil. De même, l'addition correspondra à leur superposition. Encore une fois, ces définitions sont relatives à un seul type de récepteur : l'oeil. En effet, l'oeil ne saura pas discerner la lumière blanche produite par la lumière solaire de la lumière blanche produite par l'addition de deux couleurs complémentaires (λ_1 et λ_2) telles que :

$$L_{\lambda_1} + L_{\lambda_2} = L_W$$

alors que, dans le même cas, un appareil physique (un prisme) fera immédiatement une différence : soit un spectre continu ou seulement deux raies. En passant, on retrouve ici le problème du blanc étalon et de sa qualité.

Il faut donc préciser les équations qui peuvent traiter des sensations lumineuses en termes d'addition (soustraction) et multiplication (division).

3.3.2. Enoncés des lois de Grassman

Ces lois résultent de données expérimentales. Elles cherchent à appliquer à un récepteur “photonique” des propriétés de détection qui soient directement liées aux flux de photons responsables des sensations de luminance.

1ère loi de Grassman : Quand deux sensations lumineuses sont indiscernables (“identiques”), après les avoir modifiées d'un même rapport, on a toujours égalité des

luminances :

$$L = L' \quad K.L = K.L'$$

En pratique, la variation des valeurs de K reste limitée car il faut appliquer cette loi séparément pour chaque type de récepteur (cf. Effet Purkinje).

2ème loi de Grassman : Deux sensations lumineuses restent indiscernables si on leur superpose une même sensation lumineuse.

$$L = L' \quad L + L'' = L' + L''$$

Comme pour K, la valeur de L'' reste limitée en pratique.

Ayant défini proportionnalité et addition des luminances, on peut, abstraitement, définir une soustraction.

Par exemple :

$$L = L_1 + L_2 \text{ serait équivalent à } L_1 = L - L_2$$

Cette généralisation de l'équation colorimétrique fondamentale permet de décrire les luminances de pourpres. On a vu, en effet, que les pourpres étaient les complémentaires des verts donc :

$$L_{\text{pourp}} + L_{\text{vert}} = L_W$$

On peut donc décrire la luminance des pourpres comme :

$$L_{\text{pourp}} = L_W - L_{\text{vert}}$$

4 ORIGINE DE LA COULEUR

La couleur résulte de plusieurs types de phénomènes physiques. Nous en avons déjà vu quelques uns au semestre précédent :

les interférences lumineuses (couleur des lames minces),

la diffraction (couleur des opales),

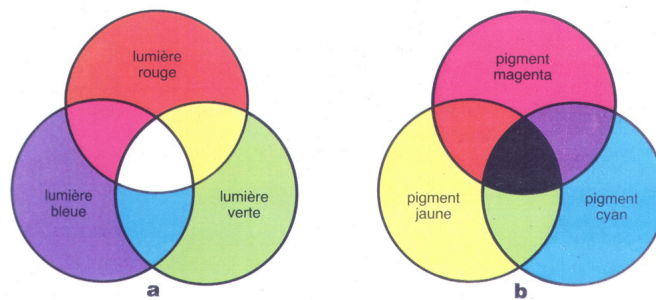
la diffusion (bleu du ciel),

la dispersion (prisme, diamant),

les transitions énergétiques (excitation - désexcitation du Na, fluorescence).

Il en existe d'autres comme les résonances avec absorption dans les composés organiques (rôle des orbitales moléculaires). Ce phénomène contribue à la sensation colorée que nous avons de nous même ou de nos vêtements ...

5 SYNTHÈSE DE LA PERCEPTION COLOREE



5.1. Synthèse additive (a)

Projecteurs sur un écran (cf figure a)

Télévision couleur

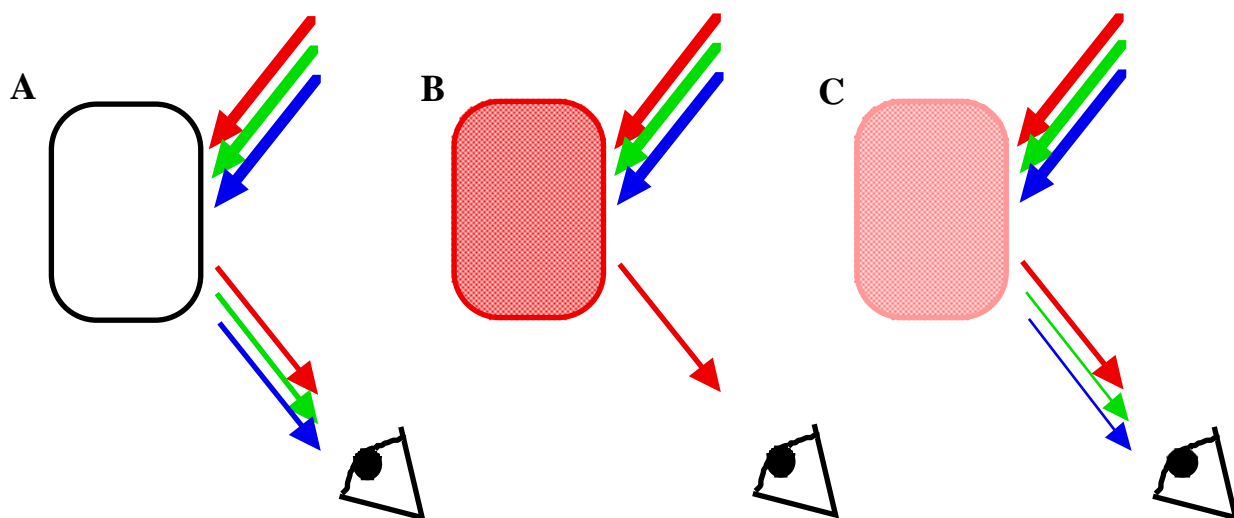
Pointillisme : Seurat, Signac, Cros, Matisse



Le port de Saint Tropez - Signac

5.2 Synthèse soustractive (b)

Justification physique de la vision colorée d'un objet



La couleur perçue par l'observateur (œil de la figure) résulte des phénomènes d'absorption, réflexion et diffusion.

Soit l'éclairement d'un objet (A : blanc, B : rouge, C : rose) par de la lumière blanche (rouge + vert + bleu).

A : si les pourcentages de rouge, vert, bleu ne sont pas modifiés parce que l'objet n'est pas sélectif, la lumière perçue est blanche, donc l'objet est perçu comme blanc mais moins lumineux que la lumière incidente (ou gris si luminance insuffisante en cas d'absorption forte).

B : si l'absorption se fait dans le bleu et le vert, la lumière réfléchiée par l'objet est perçue rouge, pure, saturée.

C : si l'absorption n'est pas totale dans le bleu et le vert, le mélange de lumière apparaît comme du rouge pur avec du blanc sensation de rouge non saturée : rose.

Remarques :

1 Indépendance des grandeurs Luminance, tonalité et saturation

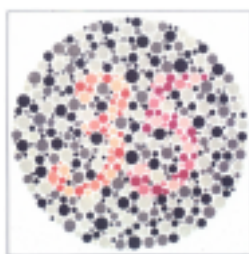
Physiquement, elle sont séparées, mais physiologiquement, on constate qu'en augmentant la luminance :

- le rouge et le vert tendent vers le jaune,
- le violet et le bleu-vert tendent vers le bleu.

Donc, aux fortes intensités, le spectre tend à se réduire au bleu et au jaune.

2 Les milieux transparents de l'œil influent également sur la sensation colorée. Par exemple, le cristallin absorbe les courtes longueurs d'onde (bleus et violets) ; avec l'âge ce phénomène s'accroît. La vision dérive vers une prédominance des orangés, c'est une dyschromatopsie acquise progressivement qui est peu ressentie. Dans le cas de la cataracte, opacité du cristallin, on est amené à retirer le cristallin par chirurgie, la transition est alors brutale et sensible pour le sujet. Ainsi, Claude Monet, opéré par le Dr Coutelas, a-t-il redécouvert les bleus et les violets si bien que ses Nymphéas sont passées des nuances jaune-orangées à des nuances de bleus et de violets sur ses tableaux "post-chirurgicaux".

Pour détecter les dyschromatopsies, on peut utiliser les figures d'Ishihara :



cherchez le nombre 35 !

6. ANALYSE DU MESSAGE SENSORIEL A PARTIR DE SA DECOMPOSITION EN 3 COULEURS PRIMAIRES : LA SYNTHÈSE TRICHOME

Young (1802) : nombre limité de récepteurs théorie trichrome

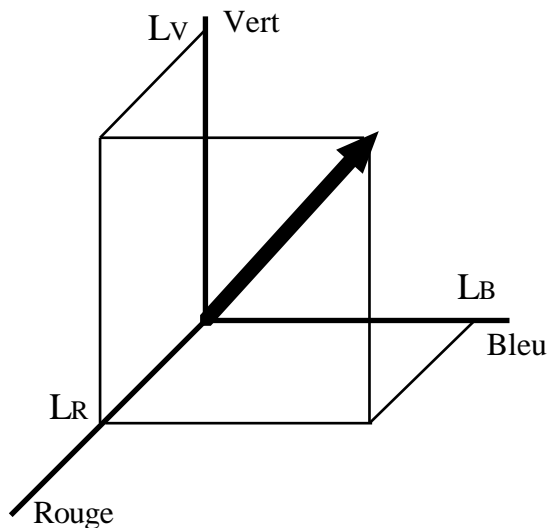
Maxwell (1850) : 1 couleur = mélange de 3 couleurs

6.1. Espace chromatique

L'expérience montre que toute sensation colorée peut être reproduite par la superposition de 3 teintes : rouge, vert et bleu. On peut écrire que la sensation de luminance L vaut :

$$L = L_R + L_V + L_B$$

et on peut décrire L en termes de vecteurs, faits de 3 composantes unitaires, indépendantes R, V, B .



Une sensation L peut donc être représentée comme un point de cet espace défini par R, V, B . Les faibles luminances sont près de l'origine et les fortes luminances en sont loin. C'est un espace vectoriel.

Une luminance s'écrit selon :

l'équation colorimétrique fondamentale : $L = L + L_W$

la superposition trichrome : $L = L_R + L_V + L_B$

donc : $L + L_W = L_R + L_V + L_B$

D'après la 1ère loi de Grassmann $kL_R + kL_V + kL_B = kL + kL_W = kL$

Donc, l'ensemble des points correspondant à des luminances variables de même tonalité, qui respectent la loi de Grassmann, sont situés sur une droite passant par l'origine O . Ils représentent tous des quantités différentes de la luminance d'une même couleur (mêmes proportions de R, V, B).

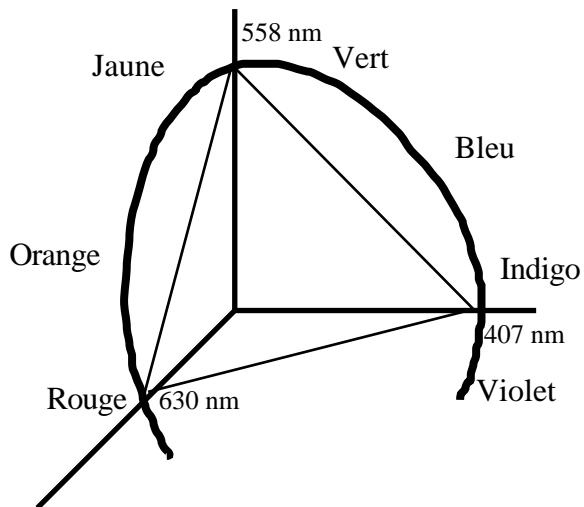
L'ensemble de ces points présentent la même saturation p . En effet :

$$p = \frac{L}{L + L_W} = \frac{k L}{k L + k L_W}$$

La luminance augmente quand on s'éloigne de l'origine sur la droite.

Il faut garder à l'esprit que les 3 couleurs primaires doivent être choisies de telle façon que la tonalité d'une primaire ne puisse pas être reproduite par un mélange des deux autres (en mathématiques, on parle de composantes orthogonales, nécessaires

pour définir une base de l'espace vectoriel).



On remarque :

- le plan matérialisé par le triangle en traits fins est tel que ses points respectent l'équation : $L_R + L_V + L_B = \text{constante}$, donc représentent une luminance identique pour des R, V, B différents.

- la nappe des droites correspondant aux teintes spectrales a une intersection avec ce plan qui est.

- l'ensemble des de la lumière spectrale ($p=1$) correspond à un ensemble de droites formant une nappe, ouverte aux extrêmités : le rouge lointain et le violet, et passant par O et les points r, v, b.

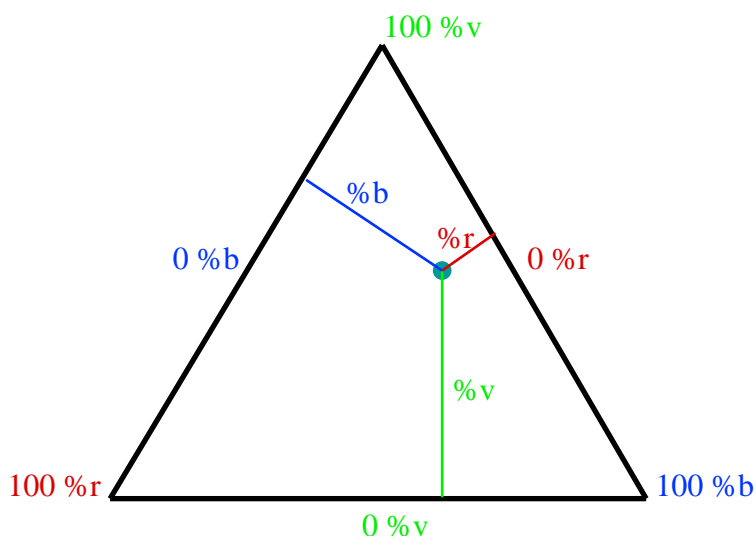
6.2. Triangle des couleurs (triangle de Maxwell)

6.2.1. Construction

Pour l'étude des couleurs, il est inutile de considérer tout l'espace puisque tous les points d'une droite passant par O ont la même couleur. Si, pour simplifier cette représentation, on se place à luminance constante, donc dans le plan pointillé, les couleurs seront décrites par deux paramètres :

- la tonalité,
- la saturation.

Dans le mode trichromatique, l'intersection d'un plan de L constant avec le trièdre RVB constitue un triangle équilatéral ($L_{1,R} = L_{1,V} = L_{1,B}$). Dans le plan de ce triangle, chaque point peut être représenté par la proportion de chacune des 3 primaires réalisant la couleur du point en question.



6.2.2. Position du blanc

Le blanc est réalisé par la superposition des trois primaires, en théorie dans les mêmes proportions. L'expérience montre que ces proportions ne sont pas 1/3, 1/3, 1/3 et que la luminance du bleu doit être plus faible que celle du rouge et du vert en raison de la sensibilité de l'œil. Par commodité de représentation géométrique, nous garderons un triangle équilatéral avec le blanc (W) au centre de gravité.

Signalons que, pour ce point W, la saturation est nulle tandis qu'elle est maximale (= 1) pour l'ensemble des couleurs spectrales.

6.2.3. Position des couleurs dominantes et complémentaires

Si on choisit une couleur représentée par un point M. Celui-ci présente une couleur du spectre la plus proche, M_d , et une couleur du spectre complémentaire M_c telles que :

$$L_M = L_{M_d} + L_W \qquad L_W = L_M + L_{M_c}$$

La combinaison de ces vecteurs implique que L_M , L_{M_d} , L_W et L_{M_c} sont

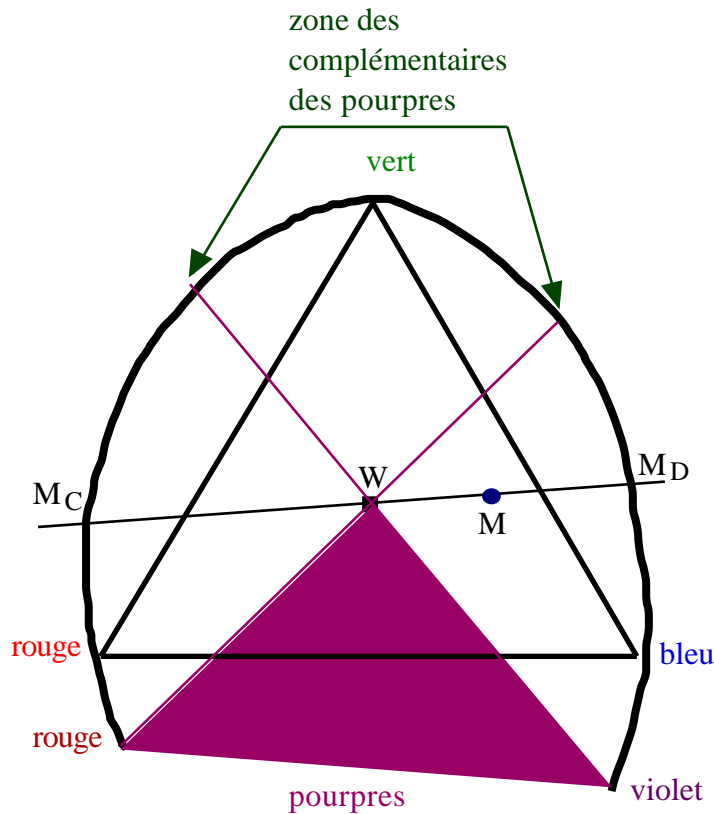
coplanaires. L'intersection de ce plan avec celui de L constante est une droite, donc ces deux équations impliquent que, dans le plan, tous les points

M, Md, W sont alignés

M, Mc, W sont alignés

donc ces points sont sur la droite MW.

Soit la représentation :



En faisant varier le point M, la droite WM pivote et bute sur les 2 extrêmités des couleurs spectrales, délimitant ainsi deux régions :

- celle des pourpres (la droite des pourpres joint les 2 extrêmités du spectre)
- celle des verts, complémentaires des pourpres.

Dans cette région des pourpres, on voit qu'on ne peut pas définir de dominante mais seulement la complémentaire.

6.2.4. Position du spectre et ses particularités

Une couleur obtenue par mélange des 3 couleurs primaires est définie, en synthèse additive, par des proportions positives et est nécessairement représentée par un point à l'intérieur du triangle. Donc, ce triangle ne permet pas de décrire toutes les

tonalités ni toutes les saturations. Il reste des espaces non décrits par les proportions positives entre le triangle des couleurs et la trace du spectre monochromatique dans ce plan. Par conséquent, lors d'une synthèse additive trichrome, on ne peut pas décrire exactement les couleurs du spectre si on veut imposer des combinaisons avec des coefficients positifs. Il en est de même en descriptopn monochromatique partir d'une dominante et d'ajout de blanc.

A l'exception des composantes R, V, B, choisies pour ce système, les couleurs spectrales monochromatiques sont beaucoup plus saturées que les couleurs décrites à l'intérieur du triangle. Théoriquement, l'un, au moins, des coefficients trichromatiques devrait être négatif, pour décrire les points extérieurs au triangle. Donc, pour décrire une couleur de luminance L dans laquelle la composante L_B serait négative :

$$L = L_R + L_V + L_B$$

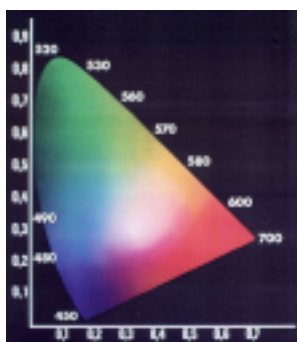
D'après la deuxième loi de Grassman, si je rajoute $-L_B = \bar{L}_B (> 0)$, j'aurai :

$$L + \bar{L}_B = L_R + L_V$$

Donc, par addition de 2 primaires en synthèse additive, on ne pourra pas décrire la tonalité pure mais s'en approcher avec un ajout de bleu à la couleur décrite.

6.2.5. Triangle international

Pour pallier l'inconvénient des coordonnées négatives, la Commission Internationale de l'Eclairage recommande d'utiliser des primaires fictives qui définissent un triangle encadrant le spectre lumineux de façon positive. L'interprétation n'en est pas facilitée !!! On peut même supposer que cette représentation pose autant de problèmes qu'elle en résoud !

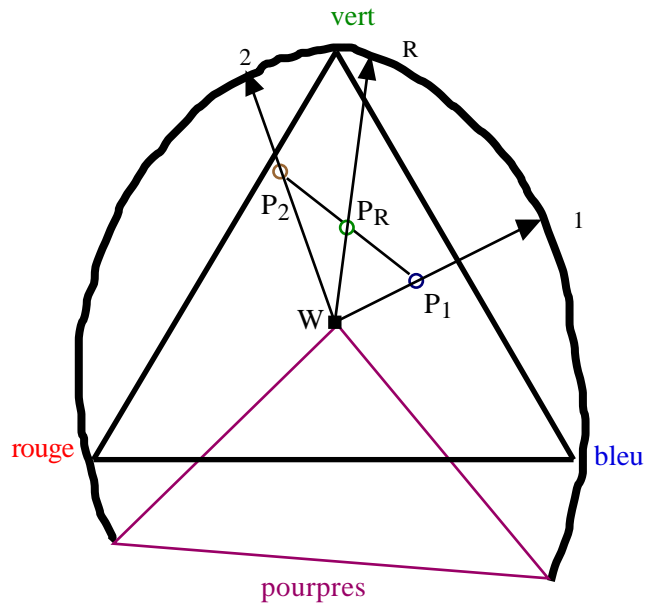


6.2.6. Mélange des couleurs et détermination des dominantes

Le triangle des couleurs permet une approche quantitative de leurs mélanges.

1er cas : Soit une couleur représentée par le point P_1 , sa couleur dominante est donnée par le prolongement WP_1 , soit λ_1 . Si je lui ajoute une couleur P_2 dont la longueur d'onde dominante est λ_2 , je peux obtenir une couleur P_R dont la dominante est λ_R .

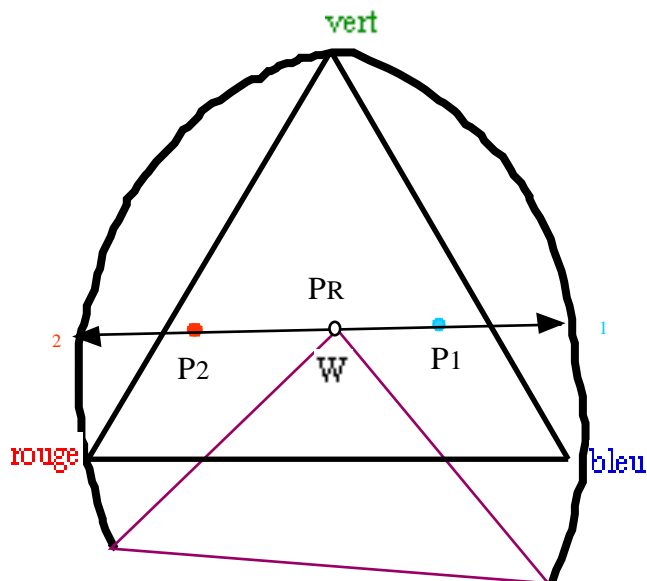
Ex : bleu + jaune → vert (couleurs désaturées)



Selon les luminances relatives de P_1 et P_2 , P_R est plus ou moins près d'un des 2 points sur le segment P_1P_2 (au milieu si 50-50%, voir les additions vectorielles dans l'espace).

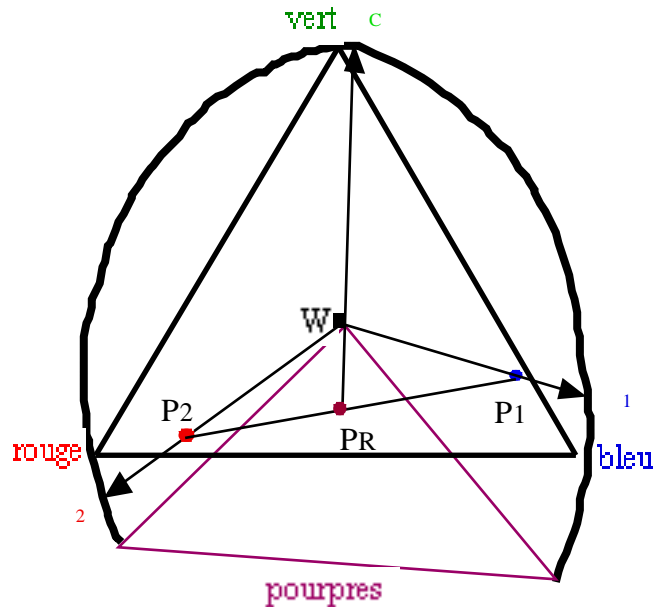
2ème cas : Si j'ajoute une couleur P_2 , de longueur d'onde dominante λ_2 , on peut, selon les proportions, obtenir du blanc.

Ex : bleu + orange → blanc



3ème cas : Si j'ajoute une couleur P₂, de longueur d'onde dominante λ_2 , on peut obtenir un pourpre définissable par sa longueur d'onde complémentaire λ_c seulement.

Ex : bleu + rouge = pourpre



7 CHAÎNE VISUELLE

Elle comprend l'œil et les voies optiques

7.1. Généralités

7.1.1. Les structures anatomiques

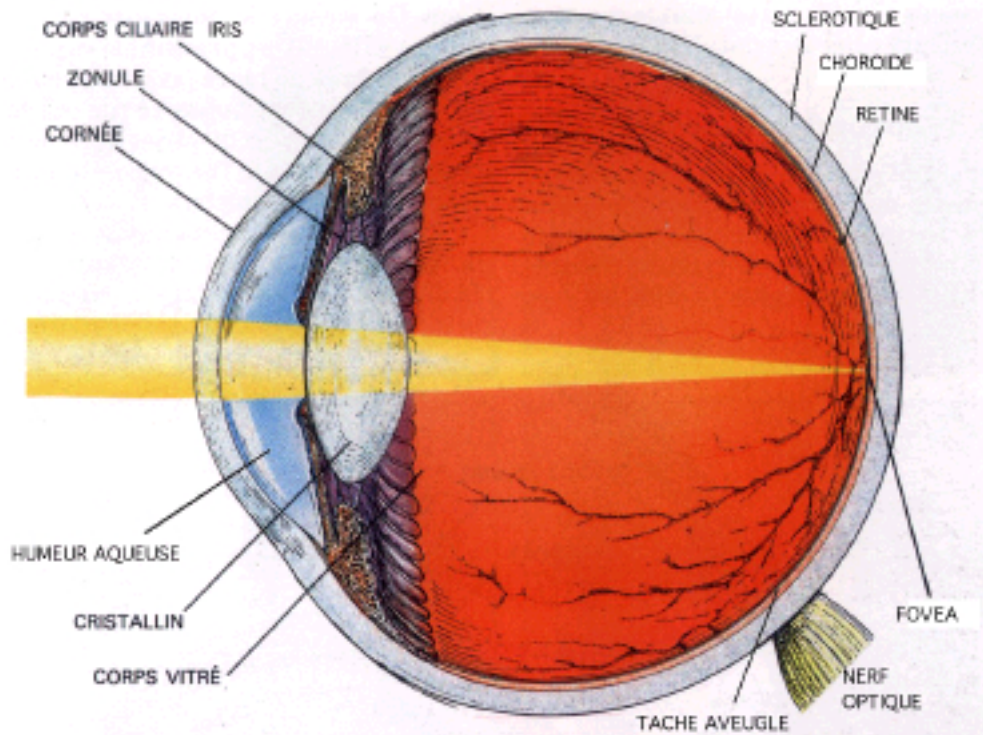
L'œil est un système optique qui a une forme approximativement sphérique, complétée à l'avant par une calotte sphérique de plus petit rayon (12 et 8 mm). Il fonctionne au début de la réception lumineuse comme une chambre photographique. Il comporte :

- une tunique externe fibreuse (la sclérotique) qui prend une forme bombée et devient transparente en avant, la cornée d'indice $n = 1,377$,
- une tunique moyenne vasculaire pour l'apport nutritif, la choroïde, qui forme en avant le corps ciliaire et l'iris,
- une tunique interne faite de tissu nerveux, la rétine, de très faible épaisseur, 500 μm , et qui présente deux zones particulières, la tache aveugle et la fovéa.

Le contenu de l'œil est constitué de trois milieux transparents, très réfringents :

- le cristallin, $n = 1,42$,
- l'humeur aqueuse, $n = 1,337$, en avant, et
- le corps vitré, $n = 1,337$.

En coupe anatomique sagittale :



7.1.2. Les rôles fonctionnels

Avant de voir en détail le rôle de certains constituants, passons ces éléments en revue fonction par fonction : certains ont un rôle d'adaptation à l'environnement, d'autres un rôle de transduction.

Rôle adaptatif

Iris : entre chambre antérieure et cristallin, la modification du diaphragme laissé libre (la pupille de 2 à 8 mm de diamètre) permet d'adapter la quantité de lumière utilisée pour faire l'image. En variant d'un facteur 4, le diamètre de la pupille autorise une variation de la brillance des objets, soit à peu près de la luminance, d'un facteur 16 (surface), ce qui n'explique pas les 5 ordres de grandeurs de L/L vus lors de la loi de Bouguer-Masson.

Cristallin : ses déformations permettent une adaptation géométrique telle que le

formation de l'image des objets se fera toujours sur la rétine, quelque soit leur position (avec des limites physiologiques). Il est opaque aux rayonnements ultra-violets, alors que la rétine y est sensible, de ce fait, il participe à l'élaboration de la partie visible du spectre électro-magnétique (cf. œil aphaque et peinture de MONET).

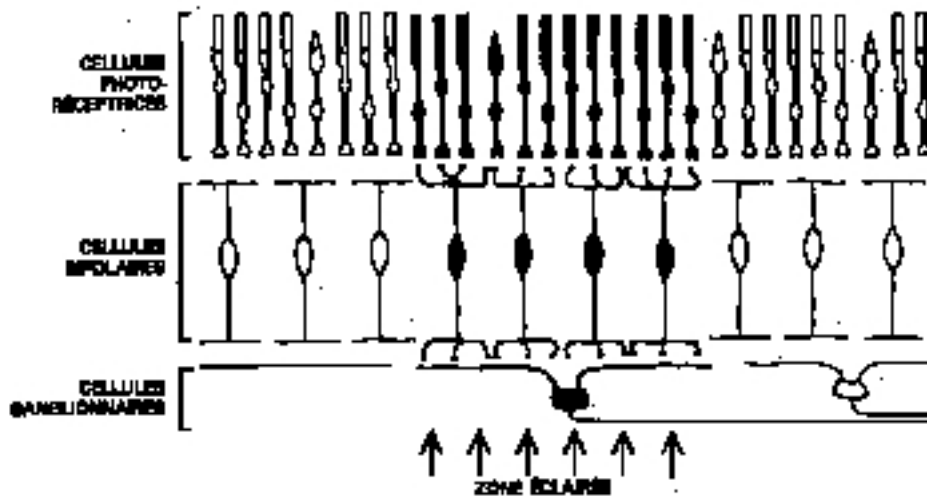
Rôle de transduction

La rétine et les voies optiques

Le schéma fonctionnel des voies visuelles est :

- Récepteurs : cônes et batonnets)
- 1er neurone : cel. bipolaires) rétine
- 2ème neurone : cel. ganglionnaires)
- corps)
- axone) nerf optique
- 3ème neurone : thalamo-cortical - corps) corps genouillé latéral
- axone) thalamo-cortical
- 4ème neurone : intra-cortical (ou cortico-cortical).

L'organisation histologique globale de ces neurones est la suivante :



La lumière traverse deux couches cellulaires avant d'arriver au récepteur lui-même, c'est une disposition en rétine inversée. Par ailleurs, les cellules de distribution horizontales, les cellules amacrines, connectent les cheminements verticaux du signal pour permettre d'analyser des notions contextuelles de l'image : par ex. la direction d'un mouvement.

La séquence des voies visuelles figure sur le schéma suivant :

vu plus tard.

	BATONNETS	CONES
Nombre	130.10 ⁶ couleur de la rétine	7.10 ⁶
Topographie	périphérie	fovéa
Vision	nocturne	diurne
Sensibilité	grande, sauf dans le rouge	faible
Acuité spatiale	faible	forte
Variance spectrale	vision non colorée	vision colorée trichrome
Adaptation	importante et lente	faible et rapide
Pigment	un seul	trois pigments

7.2 Les milieux transparents de l'œil,

7.2.1. Rappels d'optique géométrique

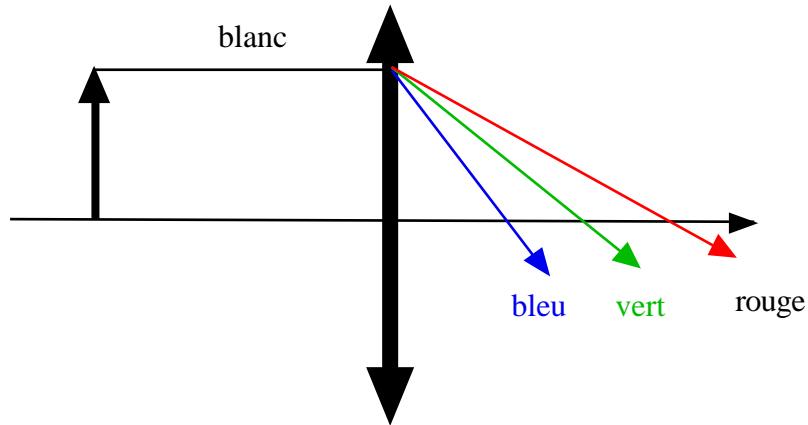
S'il y a transparence, il y a *transmission* de la lumière. Les indices de réfraction élevés par rapport à celui de l'air, associés aux courbures des surfaces, vont contribuer à la formation de l'image lumineuse sur la rétine selon des processus décrits par les lois physiques.

Loi de Descartes

Indice de réfraction : rapport de la vitesse de la lumière dans le vide et dans un milieu ($n = c/v$). Comme la vitesse de la lumière dans un milieu est fonction de la longueur d'onde, cet indice est lui-même fonction de λ . Cette variation sera représentée par la

$$\text{Dispersion : } d = n(\text{bleu}) - n(\text{rouge})$$

qui donne naissance à des aberrations chromatiques, traduites par un aspect irisé des images produites. Les grandes longueurs d'onde sont les plus faiblement déviées.



Dioptre : surface séparant deux milieux d'indice de réfraction différents. Un dioptre peut être stigmatique, c'est à dire que, partant d'un objet ponctuel, il forme une image ponctuelle : les rayons partent d'un même point objet pour aboutir au même point image. Quand un dioptre n'est pas stigmatique, un objet ponctuel a pour image une surface appelée "caustique". On a une aberration de sphéricité dès que l'on quitte les conditions de Gauss (rayons à proximité de l'axe optique), les rayons périphériques étant plus rapidement focalisés.

A la surface d'un dioptre, la déviation d'un rayon lumineux est donné par la loi de Descartes que l'on peut toujours appliquer localement, de proche en proche. Soit :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

$n \sin i$ est appelé l'invariant de réfraction.

7.2.2. Dioptres et notions d'objet et d'images

L'écriture des équations reliant les positions des objets et de leurs images nécessite le choix d'axes et d'origines. En prenant le sommet du dioptre étudié pour origine, l'axe sera colinéaire et orienté positivement dans le sens de propagation de la lumière. Soit l'objet et l'image définis par leurs abscisses :

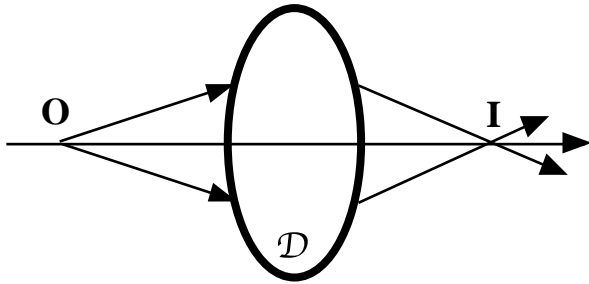
$$p_O = \overline{SO} \text{ et } p_I = \overline{SI}.$$

Nous définirons un "objet" comme le point de convergence des rayons incidents, issus du milieu de départ et une "image" comme le point de convergence de ces rayons dans le milieu d'arrivée.

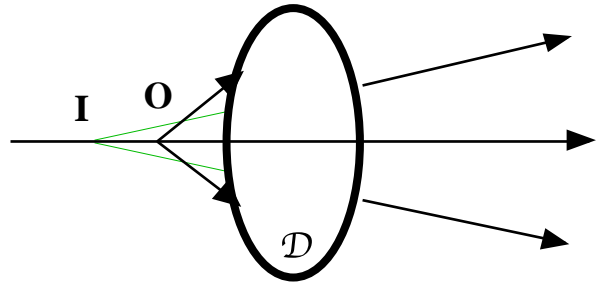
Par rapport à un dioptre donné, \mathcal{D} , on peut définir 4 cas :

schéma

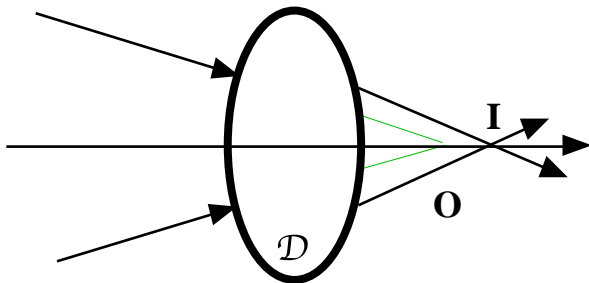
Objet et Image réels



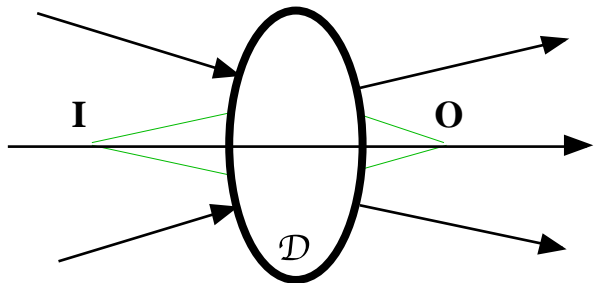
Objet réel et Image virtuelle



Objet virtuel et Image réelle



Objet et Image virtuels



Pour les dioptres sphériques qui séparent deux milieux d'indice n_1 et n_2 par une calotte sphérique de sommet S et de centre C , nous allons définir des propriétés particulières :

1/ il existe une symétrie de révolution autour de SC ,

2/ un rayon qui passe par le centre optique (C) passe d'un milieu à l'autre sans subir de déviation (notion étendue à d'autres types de dioptres),

3/ un rayon incident parallèle à l'axe passe, après réfraction par le dioptre, par un point appelé foyer image du dioptre. La distance focale image est telle que :

$$\overline{SF}_I = \frac{n_2 R}{n_2 - n_1} = f_I \quad (R = \overline{SC}) \text{ (démontrable par la loi de Descartes)}$$

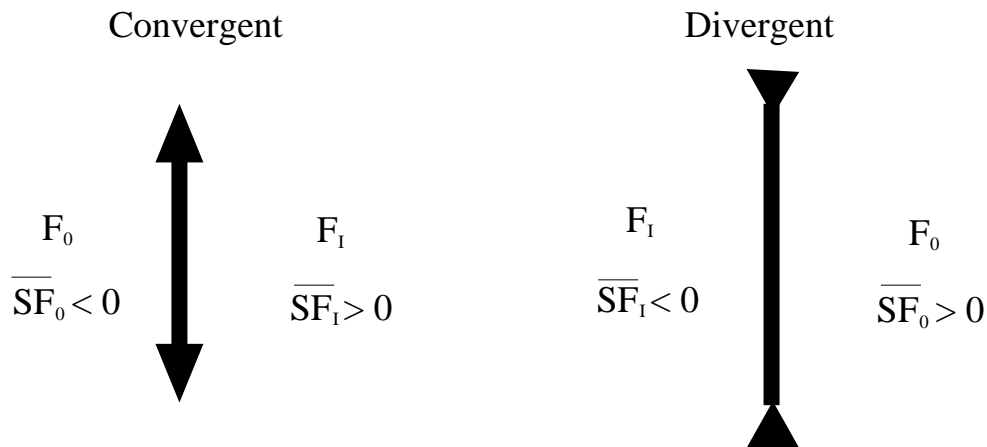
4/ il existe un point, appelé foyer objet, F_0 , tel que tout rayon incident passant par F_0 sera réfracté par le dioptre parallèlement à l'axe. La distance focale objet est telle que :

$$\overline{SF}_O = -\frac{n_1 R}{n_2 - n_1} = f_O$$

On note que :

$$\frac{\overline{SF}_O}{n_1} = -\frac{\overline{SF}_I}{n_2}$$

On peut avoir deux types de dioptries :



5/ les rayons issus d'un point P1, tel que $\overline{SP_1} = p_1$, se recoupent en P2, tel que $\overline{SP_2} = p_2$, après traversée du dioptre. Ces points sont dits conjugués et leurs positions sont liées par la relation, les "p" étant définis algébriquement :

$$-\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_2}{p_2} = \frac{n_2 - n_1}{R} = \frac{n_2}{\overline{SF_1}}$$

la quantité $(n_2 - n_1)/R$ est appelée vergence, ou puissance D, du dioptre. Elle s'exprime en dioptrie : $1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$.

On peut encore écrire la relation ci-dessus :

$$\frac{f_0}{p_1} + \frac{f_1}{p_2} = 1$$

et la notation est parfois simplifiée en utilisant la notion de proximité, soit $P = 1/p$ (inverse de la distance). La relation devient :

$$-n_1.P_1 + n_2.P_2 = D$$

elle se simplifie encore si le premier milieu est l'air et que l'on néglige sa variation d'indice par rapport au vide :

$$-P_1 + n.P_2 = D.$$

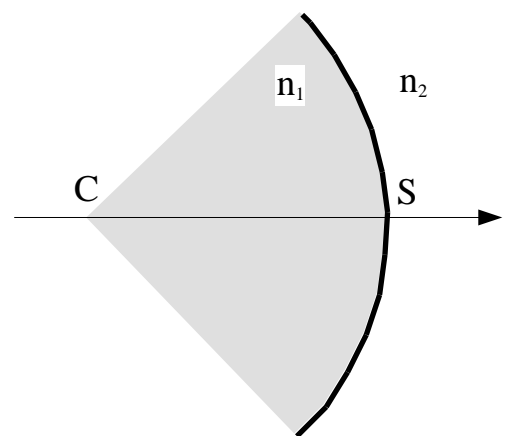
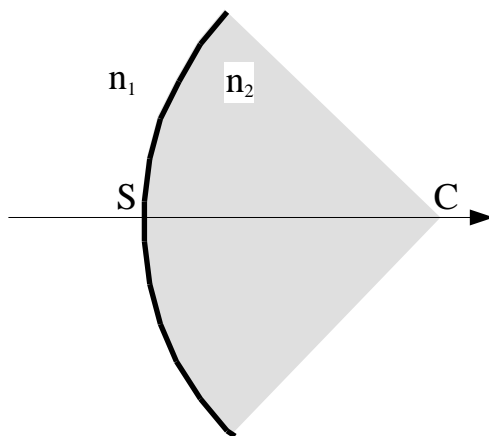
On remarque sur la formule donnant f_1 qu'un dioptre convergent, ou divergent, peut être créé de deux façons différentes :

Convergent

$$R > 0 \text{ \& } n_1 < n_2.$$

ou

$$R < 0 \text{ \& } n_1 > n_2.$$



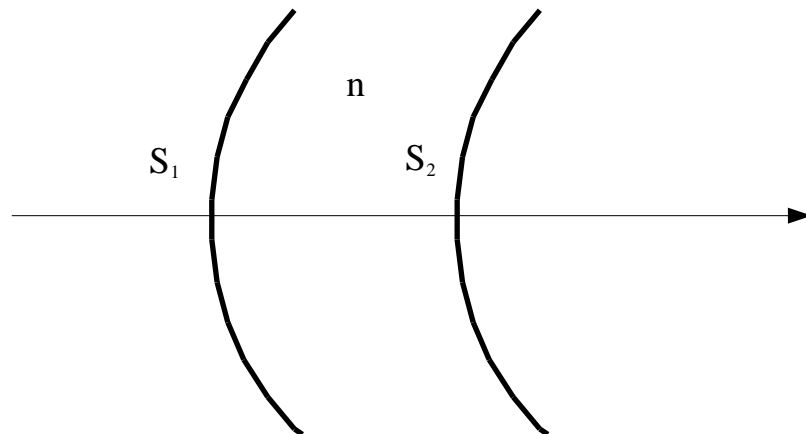
Divergent

$$R > 0 \text{ \& } n_1 > n_2.$$

ou

$$R < 0 \text{ \& } n_1 < n_2.$$

Lois sur l'association de dioptries sphériques :



1 si e, la distance S_1S_2 est petite (lentilles accolées, comme la cornée)

$$D_{\text{tot}} = D_1 + D_2$$

2 si e n'est pas négligeable (lentilles épaisses d'indice n, cas du cristallin)

$$D_{\text{tot}} = D_1 + D_2 - D_1.D_2.e/n$$

donc $D_{\text{tot}} < D_1 + D_2$.

7.2.3. Description dioptrique de l'œil

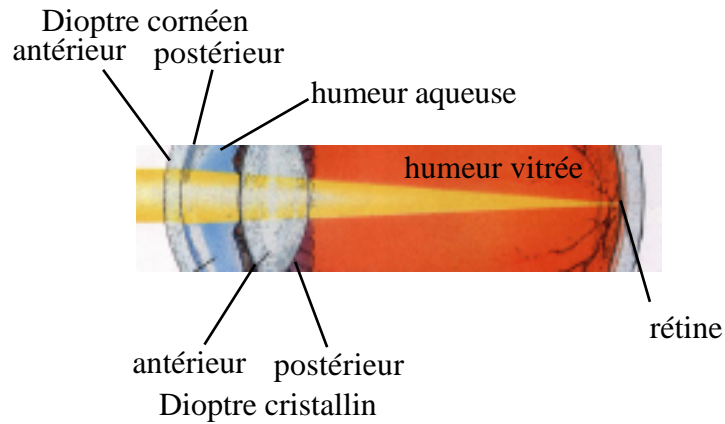
Avant d'arriver à la rétine, la lumière traverse une succession de dioptries :

- d. cornéen antérieur (air-cornée), $n_1 = 1$, $n_2 = 1,37$, $D = 48,3$

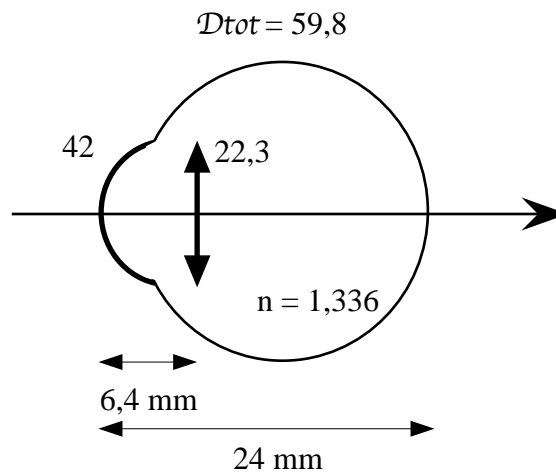
- d. cornéen postérieur (cornée-humeur aqueuse), $n_1 = 1,37$, $n_2 = 1,33$, $D = -6,1$

(variation d'indice faible)

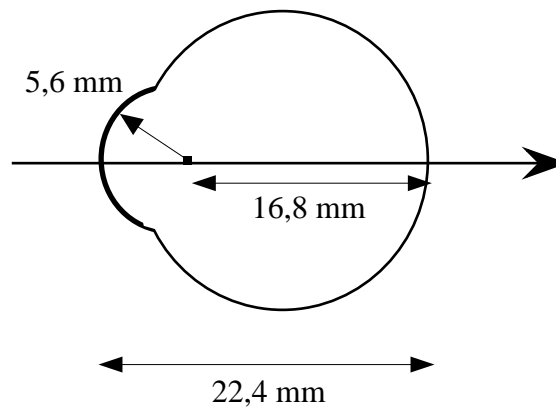
- d. cristallin antérieur, $n_1 = 1,33, n_2 = 1,42, D = 8$
- d. cristallin postérieur, $n_1 = 1,42, n_2 = 1,33, D = 14$.



Le dioptré cornéen équivaut à 42,2 et le dioptré cristallin à 21,7 en dehors de l'accommodation. Cette série de dioptrés sera représentée de manière correcte par un œil simplifié :



ou même de façon encore plus concise par un œil réduit, assimilé à un dioptré sphérique unique :



doté des propriétés suivantes : $n = 1,337$; rayon = 5,6 mm ; centre optique à 17 mm en avant de la rétine, soit une puissance $D = 60$.

L'utilisation de cet œil réduit permettra une description facile des anomalies de l'accommodation.

7.2.4. Accommodation

7.2.4.1 Définitions et propriétés

Pour voir nettement un objet, son image doit se former sur la rétine. Soit $P_0 = 1/p_0$, la proximité de la rétine, et $P_1 = 1/p_1$, la proximité d'un objet donné, on a :

$$- P_1 + n.P_0 = D$$

On rappelle que $P_1 < 0$ et que $P_0 > 0$. Puisque P_0 est une constante fixée par la taille de l'œil, la variation de la proximité P_1 nécessitera une adaptation de la puissance D : c'est le phénomène d'accommodation.

Cette puissance variera entre un maximum et un minimum, soit D_{\max} et D_0 . L'amplitude de variation, $D_{\max} - D_0$, s'appelle amplitude maximale d'accommodation ; elle évolue à partir de 14 dioptries en décroissant avec l'âge (presbytie).

Age	10	20	30	40	50	70
Accommodation (D)	14	10	7	4,5	1	0,25

Les mécanismes de l'accommodation reposent sur :

- la diminution des rayons de courbure antérieure et postérieure du cristallin. Sa puissance passe ainsi de 21,7 D à 28,3 D et de 60 à 65,7 D pour l'œil global. Toute l'amplitude d'accommodation n'est pas expliquée, donc il existe aussi
- une augmentation de l'indice moyen du cristallin avec la courbure par modification relative des structures lamellaires du cristallin.

7.2.4.2. Conséquences sur l'œil normal : Remotum et Proximum

Comme D évolue entre deux valeurs, la proximité, et la position des objets, aussi. Pour une accommodation minimum, l'œil verra l'objet le plus éloigné possible (Remotum) et pour une accommodation maximum, l'objet le plus proche possible (Proximum).

A l'état normal, on dit que l'œil est emmétrope, la puissance est telle qu'un objet à l'infini est vu net sans accommoder, donc : $P_1 = P_R = 0$, ce qui entraîne

$$n.P_0 = D_0$$

on dit que le punctum remotum est situé à l'infini.

Lorsque l'accommodation est maximum, le point le plus proche, punctum proximum, est tel que :

$$- P_P + n.P_0 = D_{\max}$$

soit $- P_P + D_0 = D_{\max}$ ou

$$P_P = -(D_{\max} - D_0) = - A$$

7.2.5. Les amétropies sphériques

7.2.5.1 Définitions

Lorsque le punctum remotum n'est pas placé à l'infini, on parle d'amétropie ; il existe alors une anomalie de vergence de l'œil qui est trop ou pas assez convergent, l'œil est dit myope, ou hyperope.

La myopie, ou l'hyperopie, sera quantifié par l'écart à la normale sans accommodation, soit :

$$D_{0, M} = D_{0, E} + d_M$$

et $D_{0, H} = D_{0, E} + d_H$

d_M et d_H sont respectivement positif et négatif.

7.2.5.2. Conséquences sur les positions des Remotum et Proximum

Dans ce cas, on a : $P_R \neq 0$.

Œil myope

Si la vergence est plus forte (myopie) que ce qui est nécessaire pour que l'image se forme sur la rétine quand l'objet est à l'infini, on a $D_{0, M} > D_0$, donc $P_R < 0$. L'objet est réel, situé en avant de l'œil. La relation des points conjugués devient :

$$- P_R + n.P_0 = D_{0, M}$$

Si $n.P_0 = D_{0, E}$:

$$- P_R = D_{0, M} - D_{0, E} = d_M$$

La proximité du remotum est donc l'opposé de l'écart à la normale lié à la myopie.

Lorsque l'œil accomode, le proximum est déterminé par la relation :

$$- P_P + n.P_0 = D_{\max, M}$$

soit $P_P = -(D_{\max, M} - D_{0, E})$

On remarque que P_P est toujours négatif puisque :

$$D_{\max, M} > D_{0, M} > D_{0, E}$$

En combinant avec la formule du remotum :

$$P_R - P_P = A$$

Cette formule est aussi valide pour l'œil emmétrope, elle se simplifie car $R = 0$:

$$A = -P_P$$

Œil hyperope

Si la vergence est plus faible que ce qui est nécessaire pour que l'image se forme sur la rétine quand l'objet est à l'infini, on a $P_R > 0$. L'objet est virtuel et situé en arrière de la rétine

$$-P_R + D_{0, E} = D_{0, H}$$

et par conséquent :

$$-P_R = D_{0, H} - D_{0, E} = d_H$$

La proximité du remotum est encore l'opposé de l'écart à la normale lié à l'hyperopie mais comme d_H est négatif, on voit bien que le remotum est virtuel.

Lorsque l'œil accomode, le proximum est déterminé par la relation :

$$-P_P + n.P_0 = D_{\max, H}$$

soit $P_P = -(D_{\max, H} - D_{0, E})$

Tant que $D_{\max, H} > D_{0, E}$, le proximum est réel, sinon, son abscisse devient positive et il est alors virtuel (voir plus loin).

En combinant avec la formule du remotum, on retrouve : $P_R - P_P = A$

7.2.6. La presbytie : variation physiologique de l'accommodation

L'accommodation baisse avec l'âge, donc D_{\max} diminue. Classiquement, la vergence de l'œil au repos n'est pas affectée, par conséquent, le remotum reste à la même place. Comme $A = P_R - P_P$, on constate donc que P_P augmente, or un nombre négatif (cas général du proximum) qui s'accroît évolue vers zéro, donc la position du proximum s'éloigne de l'œil.

Ce résultat sera le même pour le sujet myope ou hypermétrope. Dans ce dernier cas, il peut exister une variante facheuse. En effet, la hiérarchie des valeurs de vergence est :

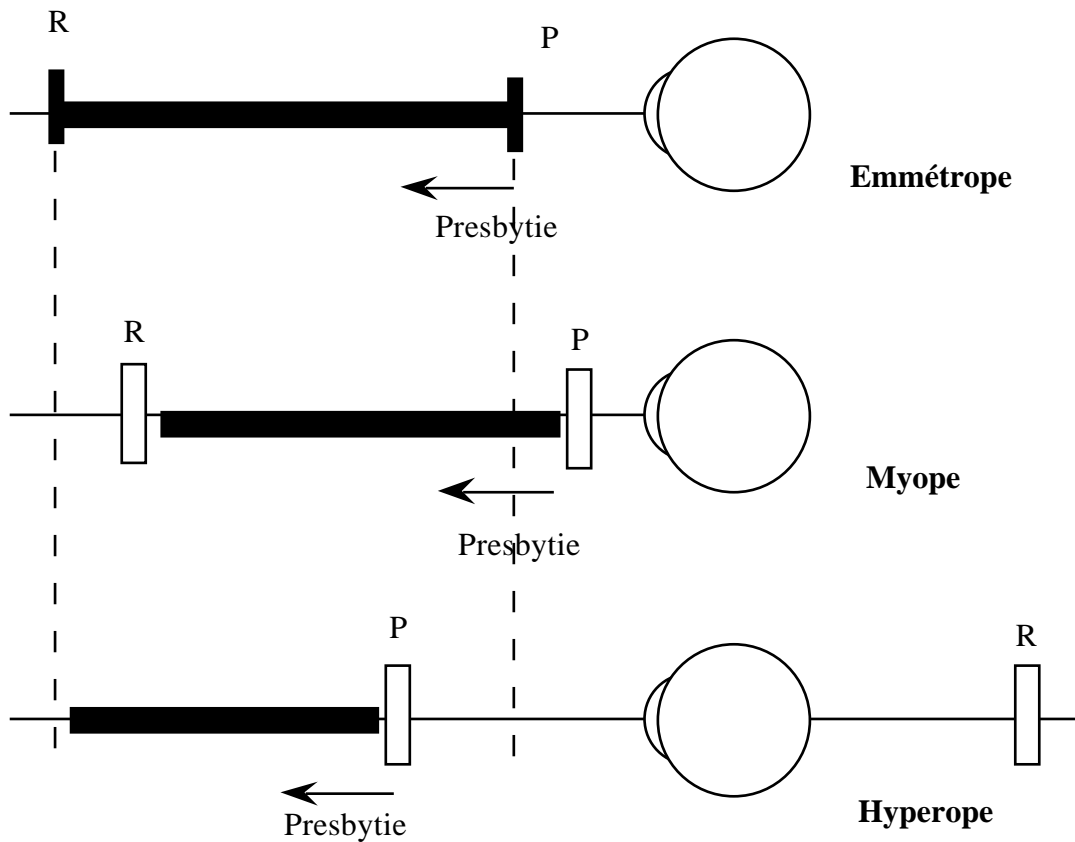
$$D_{\max, H} > D_{0, E} > D_{0, H}$$

Au cours du vieillissement, l'accommodation peut chuter d'une façon telle que :

$$D_{\max, H} = D_{0, E} > D_{0, H}$$

Dans ce cas, on a $P_P = 0$ et le proximum est à l'infini. Si l'accommodation continue à baisser, on a $P_P > 0$ et le proximum devient virtuel (comme le remotum).

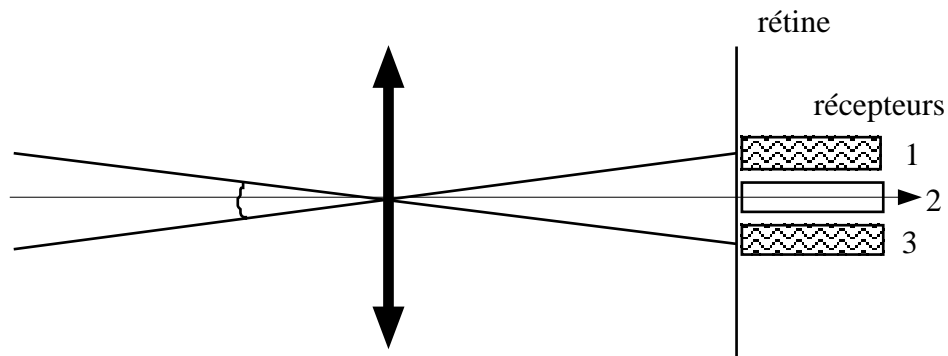
7.2.7. L'espace visuel : représentation synthétique des notions précédentes



7.2.8. Conditions complémentaires de vision nette

Ce que nous venons de voir portait sur les distances, l'image ne peut se former nettement sur la rétine que si deux conditions supplémentaires sont remplies :

1/ la taille de l'objet est suffisante pour que son diamètre apparent (exprimé en minutes d'arc) soit supérieur au minimum séparable par les récepteurs de l'œil. En effet, les limites de l'objet doivent être détectées par des récepteurs différents, eux même distants entre eux (le minimum est 1 récepteur). De cette façon les fibres nerveuses véhiculent une information non continue, différente pour le début et la fin de l'objet.

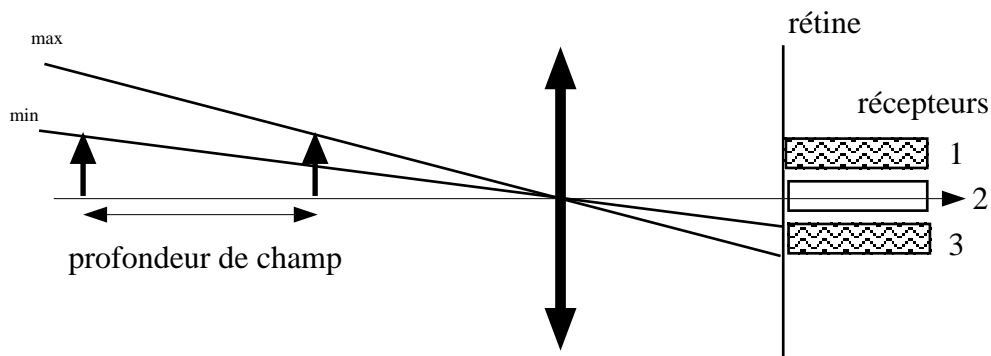


On définit ainsi l'**acuité visuelle**, soit $1/$ en minutes d'arc. Elle est maximale dans la fovéa (cf. cônes) et indépendante de la distance (c'est un angle). Attention : un objet donné qui s'éloigne sera vu de moins en moins distinctement (son angle apparent diminue).

2/ la taille de l'objet est la même sur les deux rétines en vision binoculaire.

Vision nette et profondeur de champ

L'acuité concerne une valeur moyenne de l'angle sous lequel deux objets sont vus séparés. En réalité, deux rayons faisant des angles suffisamment voisins par rapport à l'axe, frapperont les mêmes récepteurs. L'écart maximum de ces angles est d'environ 1 min d'angle (cf. taille des récepteurs et leurs dispositions). Donc, le même objet peut être vu net, pour la même accommodation entre deux distances déterminées par θ_{\min} et θ_{\max} :



Cette distance entre les 2 positions possibles de l'objet est appelée profondeur de champ. Elle ne serait nulle que pour des récepteurs infiniment petits. Cette notion est difficile à appréhender en raison de la focalisation du regard. Elle se traduit par des variations d'accommodation minimales lorsqu'on passe d'un objet éloigné à un autre objet éloigné.

Ce phénomène est bien connu en photographie : pour un réglage de distance donné, des objets situés sur des plans différents peuvent être vus nets sur l'image.

7.2.9 Origine et correction des amétropies

Historique

La description des caractéristiques optiques des lentilles convergentes apparaît déjà dans Aristophane (VI^{ème} siècle av. J.C.) : “ ... concentration de la lumière du soleil ...”. A l'autre bout du monde, Confucius évoque son souvenir d'un “cordonnier portant des verres sur les yeux”. Les premiers verres plan - convexes pour corriger de la presbytie sont utilisés par Roger Bacon (XIII^{ème} siècle). Les verres concaves apparaissent au XVII^{ème} siècle, les verres bifocaux à la fin du XVIII^{ème} siècle (Benjamin Franklin en portait). Les verres cylindriques, destinés à corriger l'astigmatisme sont mentionnés sur le nez d'Airy, directeur de l'observatoire de Greenwich (!).

Origine physiologique des amétropies

Chez le sujet emmétrope, la puissance du dioptré oculaire et le diamètre antéro-postérieur sont adaptés. Dans le cas de l'amétropie, cette corrélation est perdue et on retrouve les deux cas de :

- *myopie* : le diamètre antéro-postérieur de l'œil est trop long, l'image d'un objet situé à l'infini se forme en avant de la rétine. C'est une désadaptation du couple vergence longueur de l'œil.

- *l'hypermétropie* : le diamètre antéro-postérieur de l'œil est trop court, l'image d'un objet situé à l'infini se forme en arrière de la rétine. C'est une désadaptation inverse du couple vergence longueur de l'œil.

Très généralement, le but de la correction est de créer une image du monde extérieur telle qu'elle se situe dans l'espace amétrope. Cette transformation doit respecter quelques points particuliers. Puisque l'œil emmétrope voit net à l'infini sans accommoder, la transformation doit permettre une vision nette, sans accommoder, d'un objet situé à l'infini. Le verre correcteur doit constituer l'image de cet objet dans le plan du punctum remotum. Le principe de la correction implique donc que le foyer image de la lentille soit au punctum remotum de l'œil à corriger.

Chez l'amétrope : - $P_R^A = d^A$

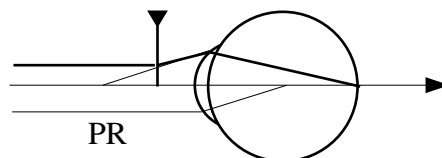
amétrope corrigé : - $P_R^C = 0 = d^A + d^C$

donc $d^C = -d^A = P_R^A$

Correction de la myopie

Un objet situé à l'infini, vu à travers une lentille divergente, a une image, virtuelle, formée en avant de la lentille correctrice. La puissance de celle-ci est calculée pour que l'image devienne un objet pour l'œil, située au P Remotum. Pour une accommodation maximum, le Punctum Proximum est repoussé de façon telle que :

$$A = R_M - P_M = R_{M,L} - P_{M,L}$$



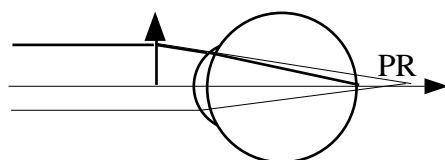
L'effet de la lentille est donc de restaurer un Espace Optique Apparent compatible avec les distances présentes dans l'espace du sujet. L'Espace Optique Réel de l'œil est celui balayé par les images vues par la lentille correctrice. Le PR passe d'une distance finie à une distance infinie tandis que le PP s'éloigne de l'œil.



Correction de l'hypermétropie

Un objet situé à l'infini, vu à travers une lentille convergente, a une image, réelle, formée en arrière de la lentille correctrice. La puissance de celle-ci est calculée pour que l'image devienne un objet pour l'œil, située au P Remotum. Pour une accommodation maximum, le Punctum Proximum est rapproché de façon telle que :

$$A = R_H - P_H = R_{H,L} - P_{H,L}$$



L'effet de la lentille est donc de restaurer un Espace Optique Apparent compatible avec les courtes distances présentes dans l'espace du sujet. L'Espace Optique Réel de l'œil est celui balayé par les images vues par la lentille correctrice. Le PR passe d'une distance finie, virtuelle, à une distance infinie, mais sans nécessiter d'accommodation, tandis que le PP s'approche de l'œil.



Correction de la presbytie chez l'emmétrope

Le principe est de rapprocher le P Proximum qui tend à s'éloigner avec la perte d'accommodation. On peut considérer deux cas :

soit, on désire rétablir une continuité de l'espace optique total (apparent avec et réel sans verres) avec l'espace optique réel,

soit on désire ramener l'espace optique apparent dans une zone proche de l'œil pour des besoins professionnels, par exemple.

Dans le premier cas, le remotum de l'espace apparent est amené sur le proximum de l'espace réel. Prenons un exemple : $D_0 = 60$, $A = 10$, donc $R = 0$ et $P = -10$. Le remotum est à l'infini et le proximum à $-1/10$, soit 10 cm en avant de l'œil. Lorsque l'accommodation tombe à 1 , le proximum devient $-A'$, soit - 1, le p proximum passe à 1 m en avant de l'œil. Si je souhaite

avoir le remotum corrigé à 1 m en avant, j'aurai une vergence totale (œil + verre = 61 D), et un nouveau proximum tel que $A' = R - P'$ et $P' = -2$, soit un PP à 50 cm en avant de l'œil.

Correction de la presbytie chez le myope

En prenant l'exemple d'un œil ayant 5 D d'excédent de vergence et une accommodation de 10 D, on a $R = -5$ et $PR = -0,20$ m et $P = -15$ et $PP = -0,07$ m. Quand on corrige l'amétropie avec un verre divergent de -5 D, le remotum passe à l'infini et le proximum à 0,1 m. Lorsque l'accommodation tombe à 1 D, le proximum avec les verres initiaux, passe à 1 m (0,17 m sans aucune correction). Si on ajoute un verre convergent de +1 D, le remotum a une proximité de -1 D. Le proximum est tel que $P = -2$, soit $PP = -0,5$ m.

Dans ces conditions, le sujet voit net :

de l'infini à 1 mètre avec les verres corrigeant sa myopie,

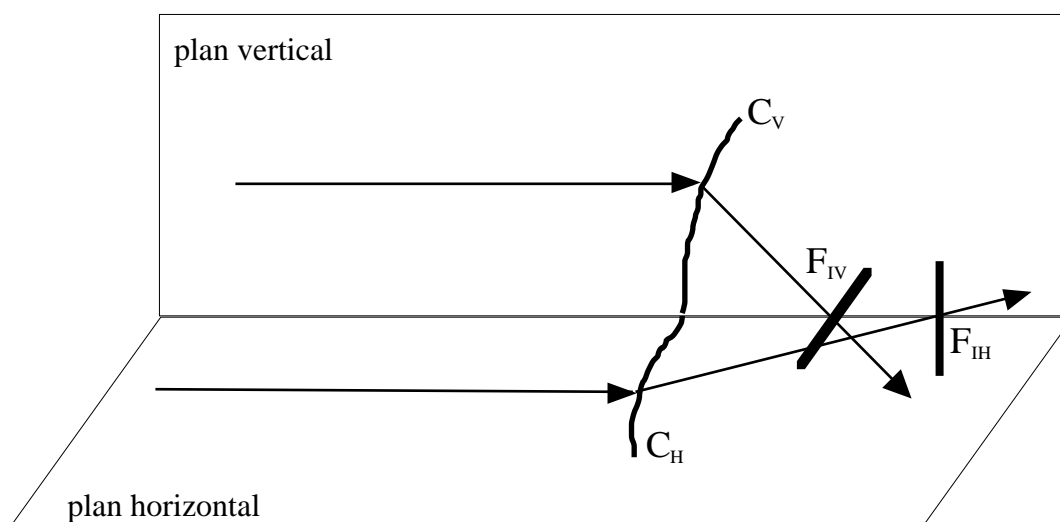
de 1 m à 0,5 m avec ses verres corrigeant myopie et presbytie,

de 0,2 à 0,17 m sans verres.

Dans ces conditions, il existe un espace optique réel non inclus dans l'espace optique apparent, d'où l'intérêt des verres à foyers variables..

7.2.10. L'astigmatisme

L'œil, un système optique en général, est astigmatique lorsque l'image d'un objet ponctuel n'est pas elle-même ponctuelle avec la même symétrie de révolution (ex : cercle --> ellipse). Cet astigmatisme oculaire est dû au fait que le dioptré oculaire ne présente plus de symétrie de révolution. La distance focale va donc varier selon les méridiens considérés :

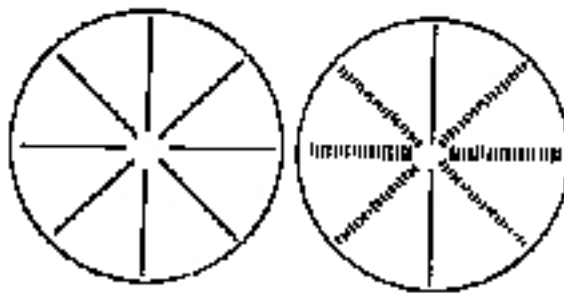


Dans cet exemple, on voit que les distances focales horizontales et verticales étant différentes, il ne peut plus y avoir une image nette dans son ensemble sur la rétine. Soit sa position est en FIH, alors les lignes verticales sont vues nettes, soit sa position est en FIV, les lignes horizontales sont vues nettes.

Le dioptré cornéen est généralement responsable de l'astigmatisme qui peut être irrégulier (cornée déformée de façon anarchique par un traumatisme ou une tumeur lente en évolution), il faut alors utiliser des verres de contact, ou régulier avec une variation progressive de la courbure. La différence entre les extrêmes, en dioptries, fournit alors le degré d'astigmatisme.

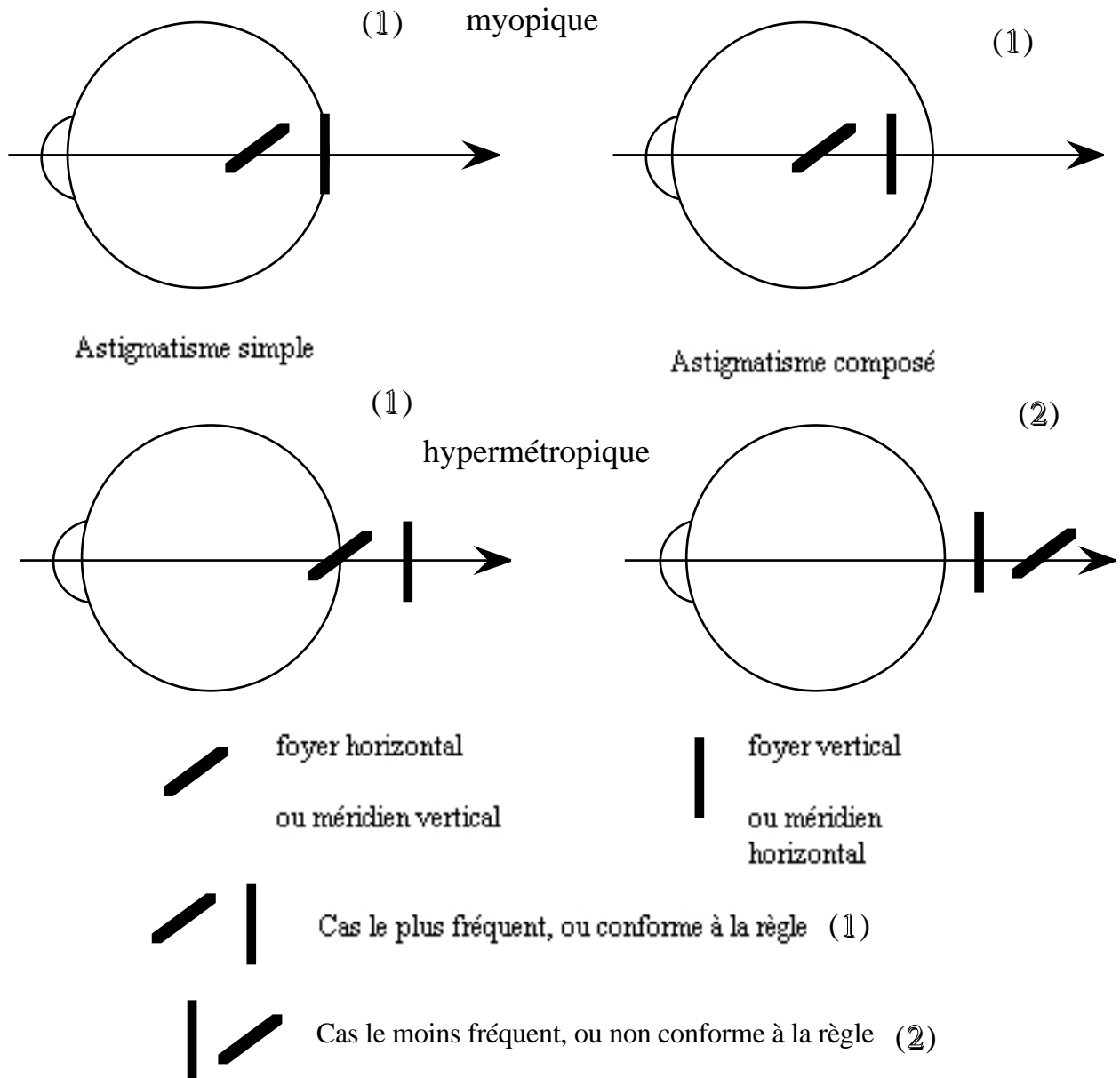
L'astigmatisme est classé selon deux critères :

- la direction des méridiens principaux,



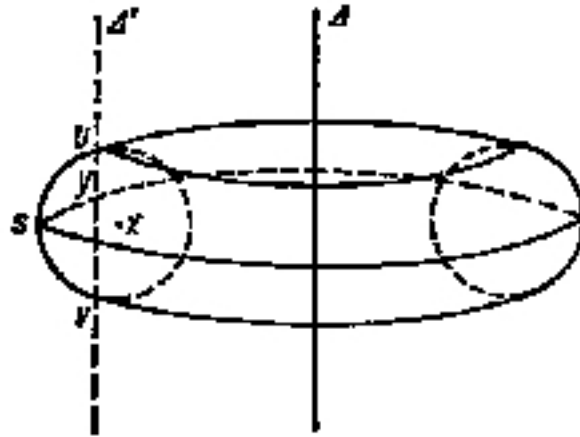
F_{IH} est sur la rétine

- la position relative des focales par rapport à la rétine.



Dans le cas d'un astigmatisme mixte, chaque foyer est d'un côté de la rétine, donc un foyer est myopique, l'autre hypermétropique. La seule variante est la conformité, ou non, à la règle.

La correction de l'astigmatisme s'effectue par des verres ayant deux rayons de courbures (verres astigmatés) placés devant l'œil de façon à ce que ses plans méridiens principaux correspondent à ceux de l'œil et permettent, au total, d'obtenir une symétrie de révolution et une vergence normale. Le principe de base repose sur le dioptré cylindrique ou torique qui permet de combiner une infinité de courbures :



Effets de la correction des anomalies de la vision

- Correction de la vergence des lentilles en fonction de la distance verres - œil

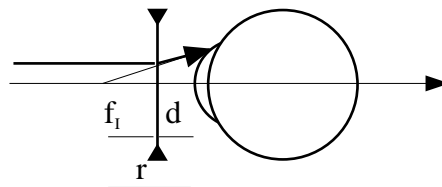
Jusqu'à ± 5 D, pas de différence. Ensuite, quand d augmente on perd de puissance pour des lentilles divergentes, tandis qu'on gagne en puissance pour des lentilles convergentes:

verres - 6 D et -5,5 pour des contacts

verres + 6 D et + 6,5 pour des lentilles

La prescription de verres correcteurs se fait pour une distance œil - verre donnée et ce paramètre devient important pour les fortes amétropies.

Soit L la puissance de la lentille. Elle doit former une image de l'objet à l'infini sur le remotum :



le remotum (proximité $R = 1/r$ par rapport à l'œil) est au foyer image de la lentille, soit :

$$r = d + f_l$$

or $f_l = 1 / L$

$$1 / R = d + 1 / L$$

$$1 / L = 1 / R - d = (1 - d.R) / R$$

$$L = R / (1 - d.R)$$

Chez un sujet myope, avec $R < 0$ et $d < 0$, le produit $d.R$ est positif, donc $L < R$ (attention aux valeurs négatives !). Ce qui implique que les verres doivent être plus divergents. En prenant comme exemple, $r = -20$ cm et $d = -1$ cm, on a :

$$R = -5 \quad \text{et} \quad L = -5/0,95 = -5,26$$

Chez un sujet hyperope, avec $R > 0$ et $d < 0$, le produit $d.R$ est négatif, donc les verres doivent être moins convergents. Parallèlement à l'exemple précédent, $r = 20$ cm et $d = -1$ cm, on a :

$$R = 5 \quad \text{et} \quad L = 5/1,05 = 4,84$$

- Effet de grossissement

Soit G le rapport des angles sous lesquels l'objet est vu à travers les verres et à l'œil nu :

$$G = \frac{1}{1 + d L}$$

Pour un myope qui porte des verres divergents ($L < 0$), le produit $d.L$ est positif, donc $G < 1$. Les verres divergents diminuent la taille apparente de l'objet.

Pour un hyperope qui porte des verres convergents ($L > 0$), le produit $d.L$ est négatif, donc $G > 1$. Les verres convergents augmentent la taille apparente de l'objet.

Pour un astigmat, G variera selon le méridien.

- Les verres correcteurs ont encore des effets sur l'amplitude d'accommodation, la convergence ou les mouvements du regard.