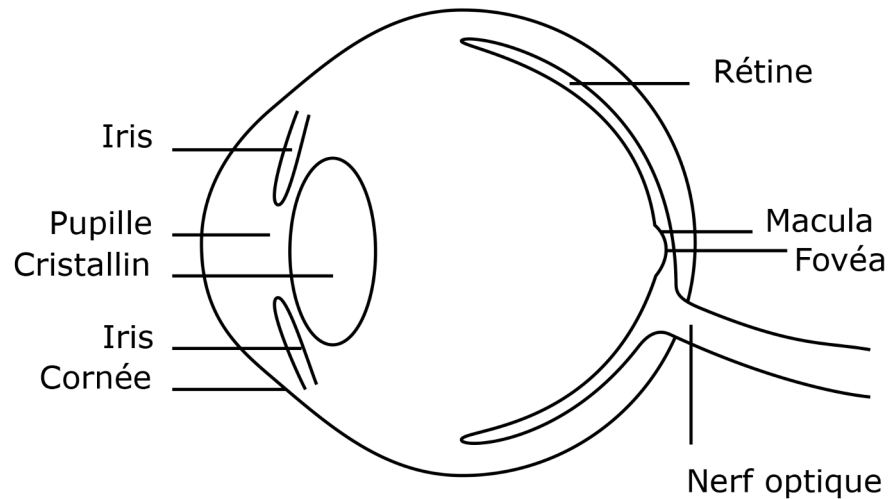


L'œil

Un œil, vu en coupe :



Macula :

Dépression de la rétine, appelée aussi tache jaune, dont la coloration a pour effet de réduire la diffraction et d'accroître l'acuité visuelle.

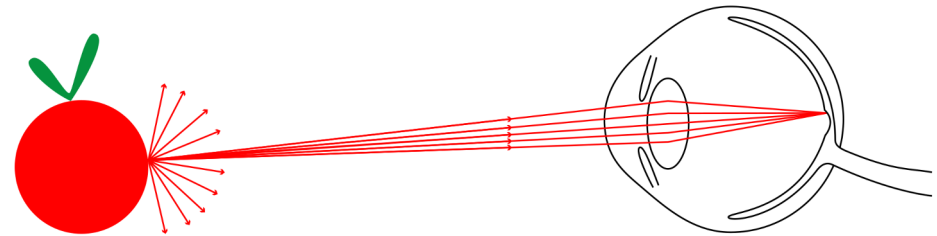
Diamètre : 3 à 5mm

Fovéa :

Zone centrale de la macula. Zone de la rétine où la vision des détails est la plus précise.

Diamètre : 1.5mm

Le rôle du cristallin



Le cristallin est une lentille convergente qui *focalise* la lumière.

focaliser

Faire converger en un point un rayonnement (lumière, onde acoustique, faisceaux d'électrons, etc.) (larousse.fr)

Tous les rayons de lumière qui partent d'un même point du champ visuel et qui parviennent à passer par la pupille aboutissent ainsi sur un même point de la rétine. L'image est nette.

Rem. Un œil plus archaïque accomplit la même chose avec une pupille très petite : seul "un" des rayons passe alors par la pupille et aboutit sur la rétine. L'image est nette mais moins lumineuse.

Vision binoculaire

En vert :

L'**hémichamp visuel** droit est traité par le cortex visuel gauche.

L'hémichamp visuel droit se projette sur la **rétine nasale** de l'œil droit et sur la **rétine temporale** de l'œil gauche.

Chaque point (chaque champ récepteur, voir infra) de la rétine nasale de l'œil droit est relié, via le nerf optique, à un point (un neurone ?) du **cortex visuel** gauche.

Chaque point de la rétine temporale de l'œil gauche est aussi relié, via le nerf optique, à un point du cortex visuel gauche.

En rouge :

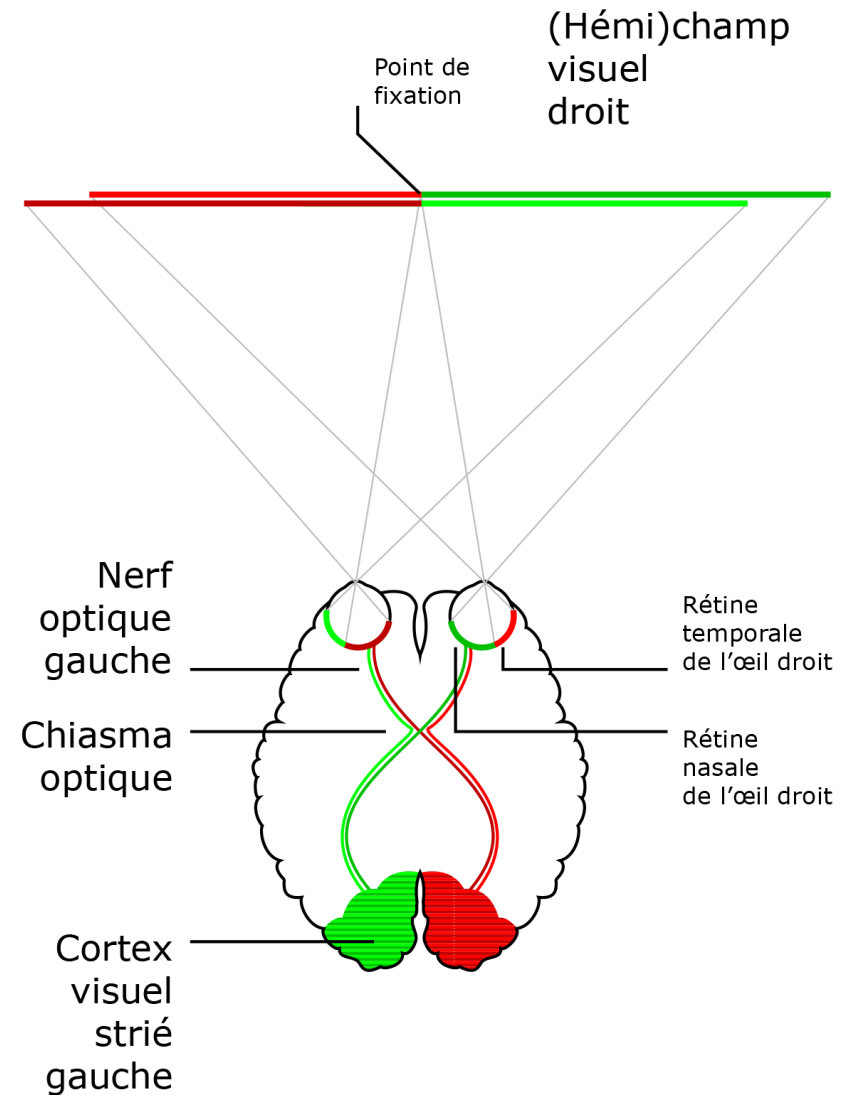
L'inverse pour l'hémichamp visuel gauche.

Sur le cortex visuel, les points provenant de la rétine nasale de l'œil droit alternent avec ceux provenant de la rétine temporale de l'œil gauche sous forme de *bandes* (ou des stries) de *dominance oculaire*, d'où l'appellation cortex visuel "**strié**".

Le cortex visuel strié réalise une carte *rétinotopique*. C'est à dire que les points qui sont contigus sur la rétine le sont aussi dans le cortex. On peut aussi bien parler d'image rétinienne que d'image corticale. La différence entre les deux images est seulement une question de déformation. L'image corticale donne par exemple une beaucoup plus grande étendue à la partie provenant de la fovéa*.

Ces quelques détails rapidement évoqués montrent bien tout le travail qu'il reste encore à faire au cerveau pour créer une image convaincante du monde à partir des informations arrivant au cortex visuel.

* Une moitié de la fovéa se situe sur la rétine nasale et l'autre sur la rétine temporale. L'axe qui relie le point de fixation (qui est aussi le point de rencontre des deux hémichamps visuels) au centre de la fovéa est appelé axe visuel de l'œil.



La rétine

Au fond de l'œil, là où aboutit la lumière après avoir traversé le dispositif optique de celui-ci, on trouve **la rétine**. La rétine est composée d'un grand nombre de cellules différentes : les cellules photoréceptrices ou photorécepteurs (sensibles à la lumière) et une série d'autres cellules qu'on peut regrouper sous le terme de cellules secondaires (qui structurent l'information transmise au cerveau via le nerf optique).

Les cellules photoréceptrices forment une couche de cellules située vers l'extérieur de l'œil. Les cellules secondaires forment principalement deux couches situées vers l'intérieur de l'œil. Un peu étrangement, la lumière doit donc traverser les cellules secondaires -transparentes- avant de rencontrer les cellules photoréceptrices.

Les cellules photoréceptrices

Les cellules photoréceptrices sont de deux types principaux : les bâtonnets et les cônes.

Les bâtonnets et les cônes sont des cellules très allongées. La partie sensible à la lumière de ces photorécepteurs, appelée *segment externe*, est située à leur extrémité, vers l'extérieur de l'œil. (La lumière doit donc aussi parcourir toute la longueur de ces cellules avant d'atteindre leur segment externe.) Ces segments externes sont d'une forme un peu différente pour les bâtonnets et les cônes, d'où leur nom respectif.

Ces segments externes contiennent un empilement de disques sur lesquels se trouve une substance photosensible, un pigment bien particulier qui capte la lumière. L'énergie de la lumière captée déclenche une série de réactions biochimiques qui sont à l'origine du signal (du message nerveux, de nature électrique) transmet via les cellules secondaires puis le nerf optique au cerveau.

Les **bâtonnets** fonctionnent lorsqu'il y a très très peu de lumière, la nuit (une nuit bien noire, sans éclairage artificiel, sans trop de lune). On parle de vision *nocturne* ou *scotopique* (de scotos, l'obscurité en grec ancien).

Les **cônes**, eux, fonctionnent lorsqu'il y a beaucoup de lumière, le jour. On parle de vision *diurne* ou *photopique*.

Entre ces deux domaines de vision, il existe un domaine intermédiaire (« entre chien et loup »), moins étudié, où les deux types de photorécepteurs fonctionnent ensemble. On parle alors de vision *crépusculaire* ou *mésopique*.

La différence principale entre les bâtonnets et les cônes est donc leur sensibilité. Celle des bâtonnets est beaucoup plus grande que celle des cônes. Ce qui signifie qu'il faut aux bâtonnets beaucoup moins de lumière qu'aux cônes pour déclencher la cascade de réactions biochimiques et produire un signal.

Dans la rétine, les bâtonnets et les cônes sont disposés en une sorte de mosaïque. Mais cette dernière n'est pas uniforme. Les bâtonnets sont beaucoup plus nombreux que les cônes et sont d'autant plus présents que l'on s'éloigne du centre de la rétine. A l'inverse, les cônes sont surtout situés dans la fovéa et à son voisinage direct. Au centre de la fovéa, les bâtonnets sont complètement absents et les cônes sont plus fins et plus serrés qu'ailleurs.

Cette disposition explique une première différence entre les visions nocturne et diurne. Alors que la nuit, vous voyez plutôt net en périphérie de votre champ visuel, le jour, à l'inverse, lorsque vous cherchez à "fixer" quelque chose, vous dirigez vos yeux afin que l'image de cette chose tombe sur le centre de votre fovéa, là où votre acuité est la plus grande.

Mais ce qui explique la différence principale entre la vision nocturne et la vision diurne c'est qu'il n'existe qu'**un seul type de bâtonnets** alors qu'il existe **trois types de cônes**.

Si « la nuit tous les chats sont gris », si la nuit les seules différences que vous voyez sont des différences de clarté, si votre vision nocturne est en quelque sorte unidimensionnelle, c'est parce qu'elle ne repose que sur un seul type de photorécepteurs.

Votre vision diurne -en couleur- repose par contre sur trois types de photorécepteurs.

Ces trois types de cônes diffèrent par la substance photosensible (le pigment) qu'ils contiennent, donc par les longueurs d'onde qu'ils captent essentiellement (auxquelles ils sont surtout sensibles) :

Les cônes S ("bleus") sont surtout sensibles aux courtes (Short) longueurs d'onde.

Les cônes M ("verts") sont surtout sensibles aux moyennes (Medium) longueurs d'onde.

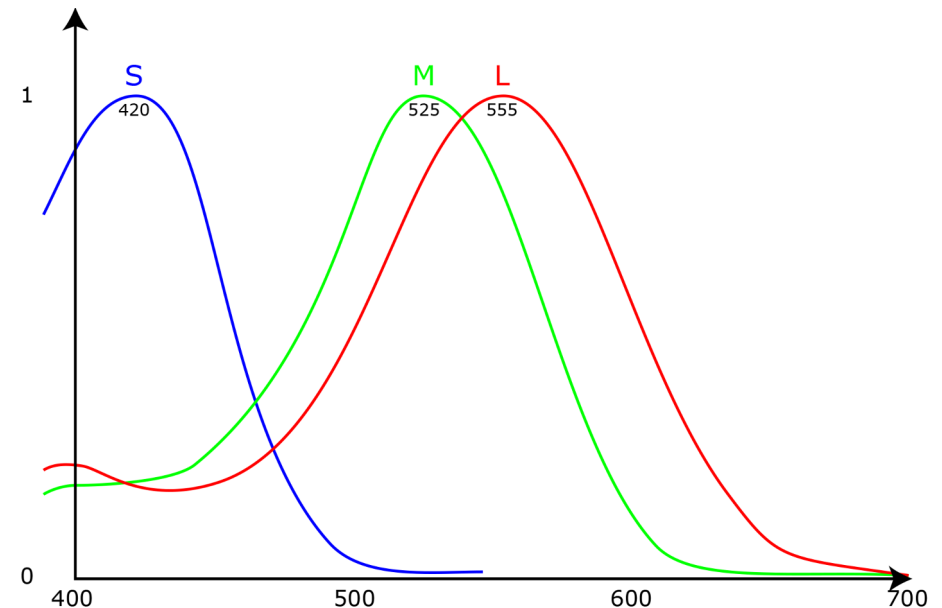
Les cônes L ("rouges") sont surtout sensibles aux longues (Long) longueurs d'onde.

La différence entre ces trois types de cônes n'est toutefois pas aussi simple. Dire qu'ils sont chacun sensible à tiers du spectre est un résumé un peu grossier de la réalité.

Les courbes de sensibilité des trois types de cônes ci-dessous montrent bien la dissymétrie de la captation. Si les cônes S sont sensibles aux seules longueurs d'onde du premier tiers du spectre (de 400 à 500nm) avec un maximum de sensibilité vers 420nm, les cônes M et L sont, eux, sensibles à l'entièreté du spectre et présentent des maxima très proches (525 et 555nm).

L'amplitude (le niveau, la force) du signal produit par un type de cône dépend donc des longueurs d'onde de la lumière qu'il capte -c'est ce qu'expriment les courbes de sensibilité- et aussi, évidemment, de la puissance de ces longueurs d'onde. Pour les cônes M par exemple, une longueur d'onde de 525nm de faible puissance pourrait avoir le même effet qu'une longueur d'onde de 560nm de puissance supérieure.

Courbes de sensibilité relative des trois types de cônes :



On voit bien l'aspect "arbitraire", "biologique", des trois sensibilités qui découlent d'ailleurs des accidents de l'évolution :

La plupart de mammifères non-primates n'ont que deux types de cônes : des cônes S et des cônes dont le maximum de sensibilité se situe quelque part entre celui de vos cônes M et celui de vos cônes L, cônes souvent appelés cônes ML. Les mammifères non-primates sont **dichromates**.

La plupart des primates, et les humains, possèdent trois types de cônes car, il y a +- 30 millions d'années, le cône primitif ML a muté pour donner deux types de cônes un peu différents, les M et les L. Les singes et vous êtes **trichromates**.

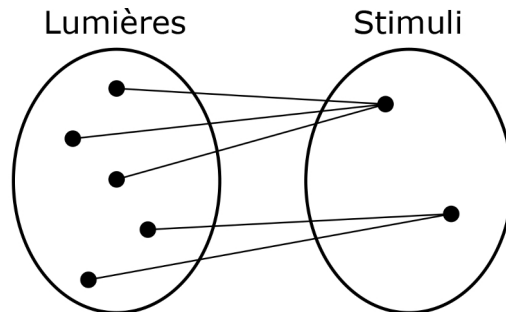
Un aspect de la captation de la lumière par les trois types de cônes qu'il faut bien comprendre, c'est le fait qu'il en découle par essence une perte d'information. Toute la richesse du spectre de la lumière captée par la rétine (la puissance de chacune de ses longueurs d'onde) se trouve réduite aux trois amplitudes des signaux issus des trois types de cônes.

De cette perte d'information résulte d'ailleurs le **métamérisme** :

Métamérisme

Des lumières physiquement différentes peuvent être visuellement identiques. Bien qu'ayant des spectres différents, voir très différents, ces lumières engendrent, à la sortie des cônes S, M et L, trois signaux de trois amplitudes identiques. On les appelle des *lumières métamères*.

On dit que des lumières métamères constituent un même *stimulus* (qu'elles stimulent d'une manière identique le système visuel).



Durant l'expérience du spectre, vous avez pu voir une lumière jaune monochromatique (une fine bande verticale dans le spectre projeté sur le mur) et une lumière jaune largement polychromatique (contenant toutes les longueurs d'onde moyennes et longues : cf. p.5 du pdf *Lumière et spectres*) créée par un filtre jaune placé devant la lampe. Si vous aviez pu comparer exactement les deux jaunes produits et les trouver identiques, ces deux lumières auraient pu être déclarées lumières métamères.

Pour tirer le maximum d'information des trois amplitudes des signaux issus des trois types de cônes, la rétine va comparer ces amplitudes. « Est-ce le signal issu des cônes M ou le signal issu des cônes L qui a la plus forte amplitude ? » « Est-ce une petite ou une grande différence d'amplitude (de quelle grandeur est cette différence d'amplitude) ? » ...

C'est ces comparaisons qui vont constituer une analyse spectrale grossière de la lumière captée. Puisque comparer par exemple l'amplitude des signaux issus des cônes M et L, c'est déterminer si la lumière est plutôt plus riche en longueurs d'onde moyennes que longues ou l'inverse.

C'est les cellules secondaires qui vont opérer ces comparaisons.

Les cellules secondaires

Pour opérer ces comparaisons, les cellules secondaires relient, connectent, un certain nombre de cônes S, M et L, constituant ainsi des **champs récepteurs** variables en taille et approximativement circulaires. En faisant l'analogie avec le capteur d'un appareil photo numérique, un champ récepteur correspond à un "pixel de votre rétine". Un champ récepteur est connecté à un neurone de cortex visuel.

Les cellules secondaires ne transmettent donc pas tels quels les signaux issus des cônes au cerveau mais elles lui transmettent d'autres signaux qu'elles élaborent à partir des signaux issus des cônes.

Durant la deuxième partie du 19^e siècle, deux clans s'opposent autour du supposé fonctionnement de la rétine. Un clan composé entre autre de Hermann Von Helmholtz (un physiologiste), Thomas Young et James Clerk Maxwell (des physiciens) et un clan composé essentiellement d'Ewald **Hering**, physiologiste et farouche adversaire d'Helmholtz.

Pour le premier clan, de nombreux indices (le fait particulièrement que le mélange de trois lumières permettent de reproduire toutes les couleurs) établissent l'existence dans la rétine de trois types de récepteurs, sensibles respectivement au "bleu", au "vert" et au "rouge". Ils se basent donc sur des preuves concrètes, matérielles, extérieures.

Hering, lui, à l'inverse, part de "la manière dont il comprend la couleur". Par simple introspection, il se rend compte de l'impossibilité du vert-rouge, du bleu-jaune et du noir-blanc. Pour lui, cette impossibilité doit nécessairement trouver sa raison d'être dans le fonctionnement de la rétine. Celle-ci doit contenir trois récepteurs antagonistes, c'est-à-dire des récepteurs qui réagissent soit "dans un sens, soit dans l'autre" (Hering parle d'assimilation et de désassimilation), ce que l'on peut symboliser par les "sens" négatif (-) et positif (+). Par exemple, le récepteur antagoniste vert/rouge donne une réponse - à la lumière "verte" et une réponse + à la lumière "rouge".

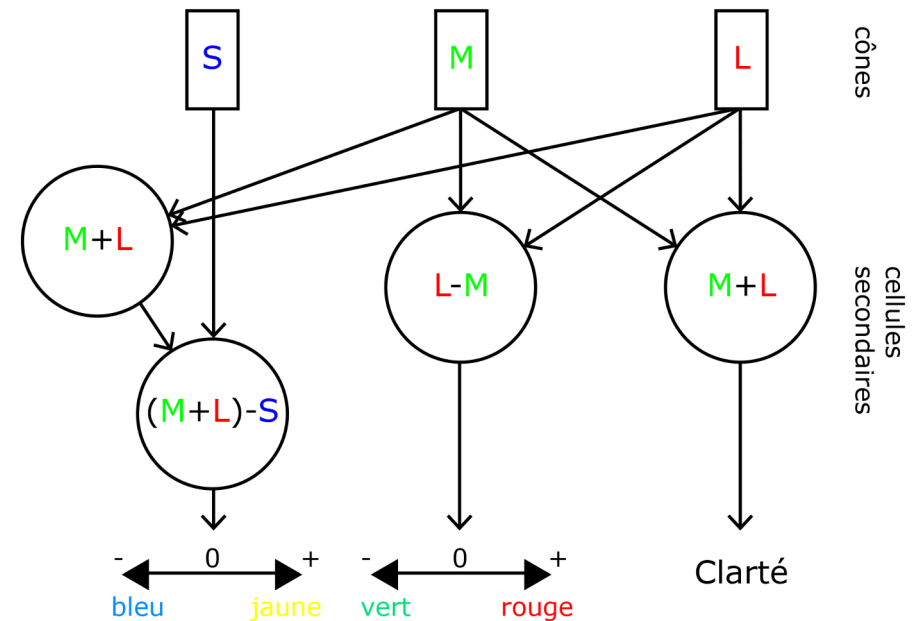
On sait aujourd'hui que le deux clans avaient raison. Ils décrivaient chacun une des deux parties du fonctionnement de la rétine : Le premier clan décrivaient le fonctionnement des cônes ; le deuxième clan, Hering, décrivait, lui, les signaux que les cellules secondaires élaborent à partir des signaux issus des cônes.

Le rôle des cellules secondaires est donc de transformer les trois types de signaux issus des trois types de cônes (les signaux **S**, **M** et **L**) en trois autres signaux : deux signaux antagonistes (un signal **vert/rouge** et un signal **bleu/jaune**) et un signal de **clarté** (plutôt qu'un antagonisme noir / blanc comme l'imaginait Hering). Cette transformation de signaux s'opère grâce aux connexions multiples qui ont lieu entre les photorécepteurs et les différentes cellules secondaires ainsi qu'entre les différentes cellules secondaires elles-mêmes. Une grande partie de ces connexions sont connues mais le moins que l'on puisse dire est qu'il s'agit d'un réseau très complexe.

Il existe différents modèles schématiques de cette transformation qui simplifient quelque peu la réalité. Dans le modèle ci-dessous, on voit :

- Les trois types de cônes, S, M et L
- Différentes cellules secondaires réalisant deux types d'opérations :
 - soit une **addition** des signaux issus de deux cônes différents (M+L par deux fois, une fois pour donner le signal de clarté, une fois pour donner le "signal jaune")
 - soit une **comparaison*** des signaux issus de deux cônes différents (L-M, pour donner le signal antagoniste vert/rouge) ou une comparaison du signal issu d'un cône (S) et de celui issu d'une cellule secondaire réalisant une addition (M+L), ce qui peut s'écrire [M+L]-S et donne le signal antagoniste bleu/jaune
- Les deux signaux antagonistes et le signal de clarté à la sortie

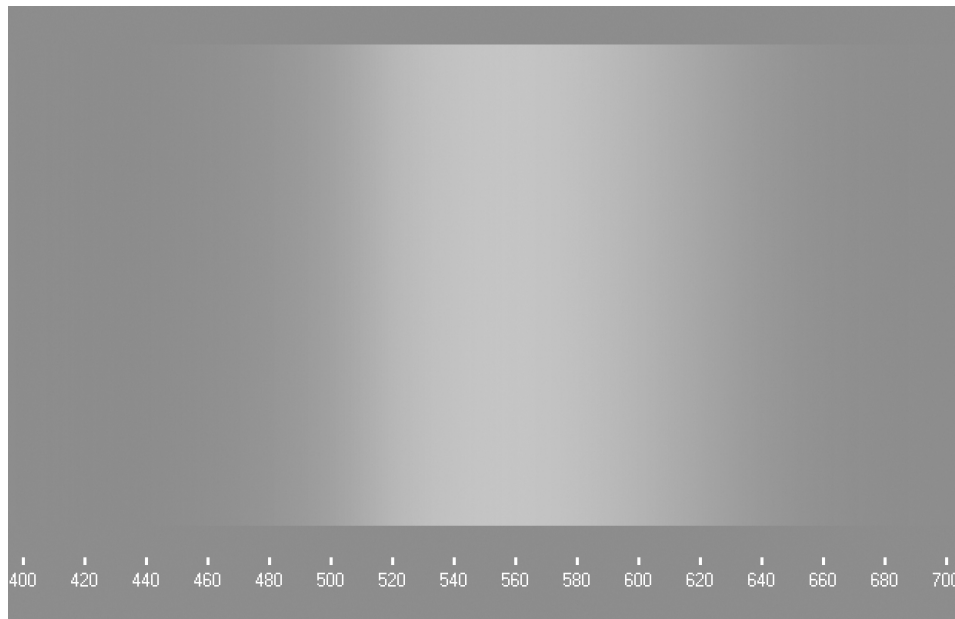
* La comparaison est symbolisée par l'opération de soustraction (-). L'objectif de cette comparaison est d'obtenir un signal antagoniste. Par exemple dans la comparaison du signal M et du signal L, si le signal M est de plus grande amplitude, le résultat de la soustraction L-M sera négatif, ce qui, dans le signal antagoniste vert/rouge généré par cette comparaison, signifie "vert". A l'inverse, si c'est le signal L qui a la plus grande amplitude, le résultat de la soustraction L-M sera positif, ce qui signifie "rouge".



Le pdf *Lumière et spectres* contenait par la phrase suivante : « Bien plus qu'une image de la lumière, un spectre est une image du fonctionnement de votre système visuel (ou du moins une image de la manière dont votre système visuel traduit la lumière). »

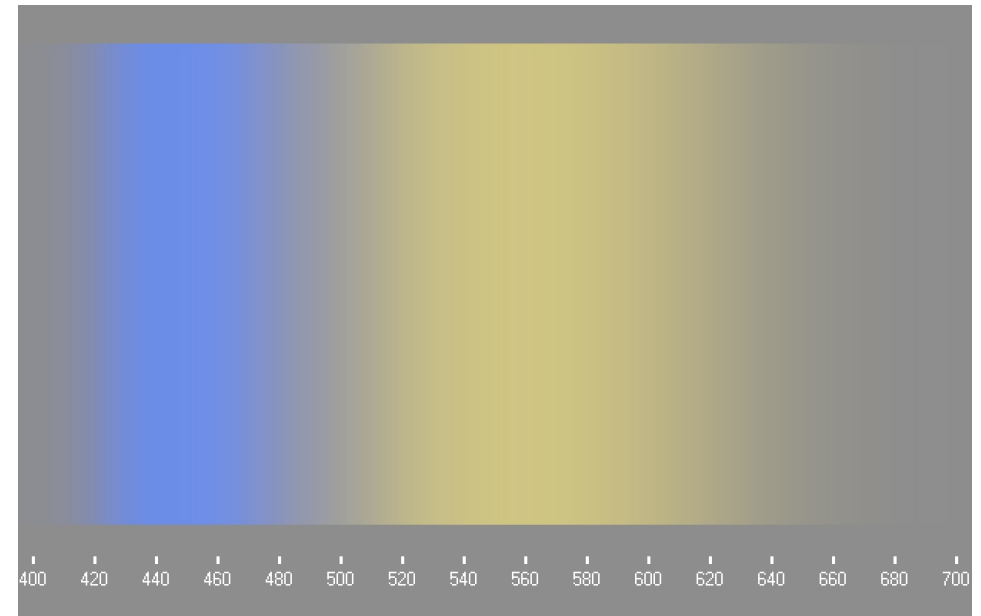
De fait, vous pouvez voir dans l'apparence du spectre, la part dont chacun des trois signaux que produit votre rétine est responsable. Ces trois parts y sont en quelque sorte "superposées".

Voici comment verrait le spectre un animal qui ne posséderait qu'un seul type de photorécepteur :



Puisqu'ils n'ont qu'un type de photorécepteur, leur vision, comme notre vision nocturne, est unidimensionnelle. Les photorécepteurs de cette animal ont, comme les vôtres, une sensibilité décrivant une courbe "en cloche" (ils sont plus sensibles aux longueurs d'onde du milieu du spectre). Ils voient donc juste une clarté qui va croissant vers le milieu du spectre.

Voici comment doivent très probablement voir le spectre la plupart des mammifères (non-primates) qui ne possèdent que deux types de cônes (les S et les ML) :

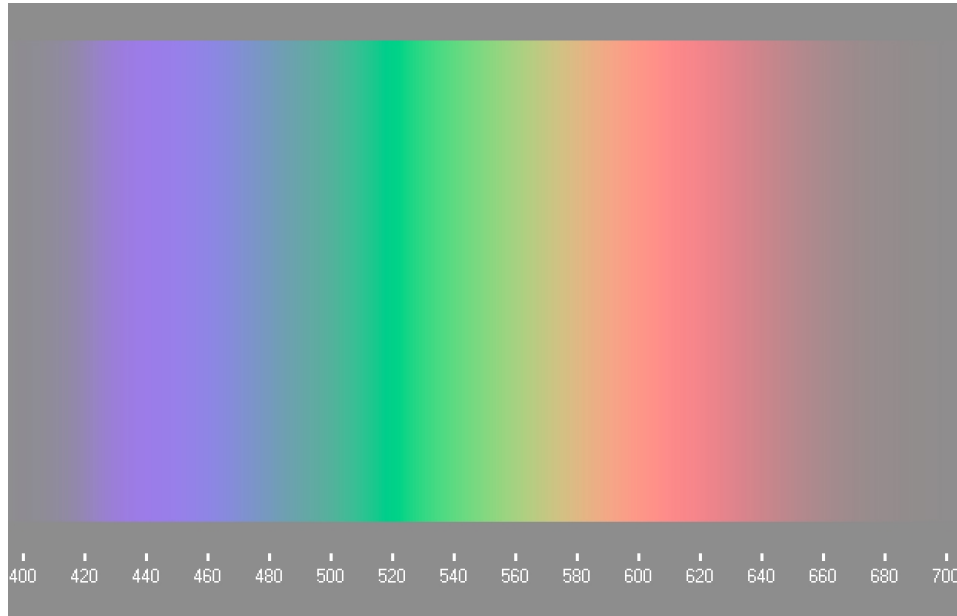


Par la comparaison des deux signaux issus des deux types de cônes, leurs cellules secondaires construisent le signal antagoniste bleu/jaune.

Pour ces mammifères, une longueur d'onde est achromatique, celle qui stimule autant les deux types de cônes et donc donne un signal bleu/jaune ni négatif ni positif, un signal à zéro.

Remarquez que d'autres cellules secondaires construisent toujours le signal de clarté (à partir du signal issus des cônes ML), ce qui donne, comme chez l'animal ne possédant qu'un type de cône, cette clarté qui va croissant vers le milieu du spectre.

Voici enfin comment vous voyez le spectre :



Rem. La zone du spectre qui va de 480nm à 550nm est impossible à reproduire de manière assez chromatique sur un écran. Pour solutionner le problème, dans cette représentation, l'ensemble du spectre a été rendu moins chromatique, plus blanc. Les rapports de chroma entre les différentes zones sont ainsi respectés. La zone bleue paraît malgré tout moins chromatique que le reste du spectre. Il y a là un aspect propre à la vision trichromatique humaine.

Comme l'animal à un type de cône, vous voyez cette clarté qui va croissant vers le milieu du spectre (M+L).

Comme les mammifères à deux type de cônes, vous voyez l'antagonisme bleu/jaune ([M+L]-S).

Mais en plus, grâce à la comparaison des signaux issus de vos cônes M et L (L-M), vous construisez le signal antagoniste vert/rouge, dont l'effet est visible "par dessus" le jaune et le bleu.

Les teintes élémentaires se situent là où un des deux signaux antagonistes est à zéro :

Par exemple le jaune se situe là où le signal vert/rouge est à zéro.

Ou, autre exemple, le vert se situe là où le signal bleu/jaune est à zéro.