

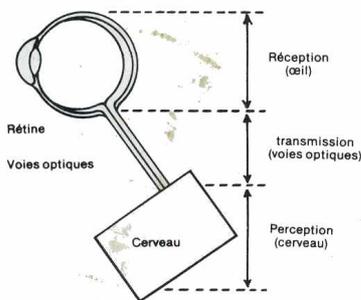
L'œil

et le système visuel humain

L'œil humain est un système optique (il se comporte de la même manière qu'une chambre photographique). Ce système forme sur la rétine une image, après que les rayons lumineux aient traversé les éléments transparents de l'avant du système (la cornée, l'humeur aqueuse et le cristallin). Ces milieux sont réfringents puisque les rayons lumineux sont déviés en les traversant.

Ces impressions visuelles reçues par la rétine sont transmises par les « voies optiques » aux centres de la vision. Ces impressions sont ensuite transformées en sensations. Ceci peut donc être décomposé en trois phases :

- une phase de réception (cellules visuelles) ;
- une phase de transmission (nerf optique) ;
- une phase de perception (le système visuel humain).



Le cristallin peut être assimilé à une lentille de mise au point dont la variation règle la netteté pour l'œil selon les distances. La déformation du cristallin permet aux images d'objets situés à des distances différentes (de l'infini à 25 cm, pour parler de l'écart le plus important) de se former nettes sur la rétine : cette opération porte le nom d'accommodation.

Quelle est alors l'amplitude de ce phénomène d'accommodation ? Quand le cristallin est le plus plat, l'œil accommode pour l'objet le plus éloigné (punctum remotum).

Quand le cristallin est le plus bombé (l'œil accommode alors au maximum) l'œil « fait le point » sur l'objet le plus rap-

proché qu'il puisse voir nettement (punctum proximum). Pour un œil normal la distance minimum de vision est de l'ordre de 25 cm. Il est possible, à partir de là, de calculer en dioptries l'amplitude d'accommodation. Celle-ci est égale à l'inverse de la distance minimum de vision distincte (0,25 m) moins l'inverse de la distance maximum (soit l'infini) c'est-à-dire :

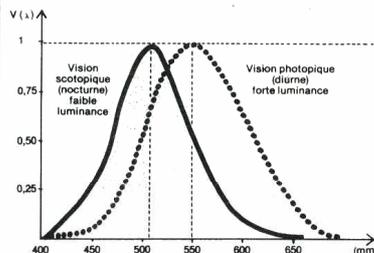
$$\frac{1}{0,25} - \frac{1}{\infty} =$$

$$4 - 0 = 4 \text{ dioptries}$$

Disons enfin que l'accommodation n'est pas instantanée : elle peut durer de 0,1 à 0,45 seconde.

La rétine est une partie du nerf optique qui tapisse le fond de l'œil sur une surface de 2,5 cm environ. C'est une couche réceptrice, possédant des éléments sensibles à l'action de la lumière (photosensibles). Elle comprend des « cellules réceptrices » divisées en 2 groupes : les cônes et les bâtonnets (il y a 136 millions de cellules dont 6 millions de cônes).

La rétine contient un récepteur diurne où les cônes jouent le rôle principal et un récepteur nocturne où les bâtonnets fonctionnent seuls. Ceci entraîne un déplacement de la courbe de visibilité (nous le verrons plus loin) quand on passe du régime dit « photopique » (vision diurne) au régime dit « scotopique » (vision nocturne). Examinons ces deux courbes de visibilité relatives :



La rétine transforme l'énergie lumineuse qu'elle reçoit en une autre forme d'énergie, qui elle agit sur le nerf. Le problème consiste alors à connaître pour les radiations monochromati-

ques visibles (c'est-à-dire comprises entre 400 et 700 nm de longueur d'onde) le rapport entre les grandeurs photométriques reçues et les grandeurs énergétiques transmises. Ce rapport a pu être déterminée par d'importantes mesures photométriques : il est appelé efficacité lumineuse du rayonnement étudié. (Ce rapport est évidemment nul pour les rayonnements invisibles au système visuel humain). Appelons K l'efficacité lumineuse. K est donc égal au rapport du flux lumineux sur le flux énergétique.

$$K = \frac{\text{flux lumineux}}{\text{flux énergétique}} = \text{efficacité lumineuse}$$

L'unité de l'efficacité lumineuse K est le Lumen par watt (voir fiche technique sur la photométrie, NPC novembre 1976). En lumière du jour, le système visuel humain a une valeur K maximale pour un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 555$ nm.

En comparant les deux courbes de visibilité relative, on peut observer que si en vision photopique (diurne) l'efficacité lumineuse K est maximale pour le rayonnement de longueur d'onde égale à 555 nm, en vision scotopique (nocturne), l'efficacité est maximale pour une longueur d'onde égale à 510 nm. $V(\lambda) = 1$ pour $\lambda = 555$ nm en vision photopique et pour $\lambda = 510$ nm en vision scotopique.

Les cellules photo réceptrices — les cônes — interviennent essentiellement pour la vision photopique en même temps que les bâtonnets tandis que lorsque le niveau de luminance diminue considérablement, le système de vision fait intervenir essentiellement les bâtonnets. Schématiquement, les cônes interviendraient pour la différenciation des couleurs et les bâtonnets pour la mesure de la luminosité : « la nuit tous les chats sont gris »

Le déplacement de la courbe de visibilité relative en vision scotopique est appelé « effet Purkinje » (1).

Preçons un exemple : pour des lumières monochromatiques de longueur d'onde 510 nm et

610 nm, les coefficients de visibilité sont égaux en vision photopique (voir schéma, $V(\lambda) = 0,50$) ; en revanche, en vision scotopique, les coefficients de visibilité atteignent 1 pour une longueur d'onde de 510 nm et seulement 0,03 pour une longueur d'onde de 610 nm. Le rapport $\left(\frac{1}{0,03}\right)$ est donc égal à 32. Ce

qui veut dire qu'il faut multiplier par 32 l'énergie de la plage 610 nm en vision scotopique, pour avoir l'égalité des luminances énergétique, pour les radiations 510 nm et 610 nm. En pratique, la nuit, l'œil accommode d'ailleurs sur les radiations bleues, ce qui entraîne une myopie de l'ordre de 1 dioptrie (2).

Acuité visuelle ou pouvoir séparateur de l'œil

C'est en fait le pouvoir de l'œil à séparer distinctement deux objets infiniment petits. L'acuité visuelle est définie par la distance angulaire qui sépare les 2 points les plus rapprochés que le système visuel peut distinguer (environ 1/3000 de radian). Pour que deux points soient distincts, il faut que les éléments rétinien impression-

(1) Purkinje, physiologiste tchèque (1787-1869), avait observé que des plages peintes en rouge et en bleu paraissaient de sensation lumineuse uniforme en vision diurne et devenaient très différentes en vision nocturne. A la tombée du jour, le bleu devenait plus clair et en revanche le rouge fonçait.

C'est-à-dire qu'une radiation rouge (de longueur d'onde environ égale à 600 nm) excite les cônes ($V(\lambda) = 0,63$) et très peu les bâtonnets ($V(\lambda) = 0,05$) tandis que le bleu violet (de longueur d'onde 540 nm) excite peu les cônes ($V(\lambda) = 0,05$) et beaucoup les bâtonnets ($V(\lambda) = 0,32$).

(2) C'est pourquoi — pour le détail — les oculaires des instruments utilisés la nuit sont marqués moins une dioptrie afin d'obtenir cette correction.

Notons enfin que lors d'une projection cinématographique, le spectateur est placé dans le cas de la vision scotopique. Le phénomène de Purkinje intervenant évidemment, le rendu des rouges est plus faible que celui des bleus.

nés soient séparés par au moins un élément qui arrêtera l'effet de continuité entre les 2 images (1). Par conséquent, si 2 points viennent se former sur le même élément photorécepteur rétinien ou sur deux éléments voisins, ils paraissent à l'œil confondus.

La valeur de l'angle limite, c'est-à-dire le plus petit angle nécessaire à la distinction de 2 points séparés, est égale (pour un sujet moyen) à 1/3000 radian, c'est-à-dire une minute d'angle. Par conséquent, si 2 points sont situés à une distance X de l'œil, celui-ci les verra séparés si leur écartement X vérifie la condition :

$$\frac{X}{X} \geq 3.10^{-4}$$

Scintillement et papillotement

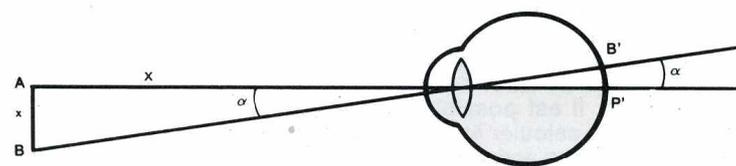
Le scintillement et le papillotement sont des troubles de la vision, chacun ayant des causes spécifiques.

Le scintillement est dû aux variations rapides de l'éclairement, produites par une lumière périodiquement variable. C'est un phénomène photométrique qui peut bien entendu se produire au cinéma puisque la lumière est masquée pendant le changement d'image. A 24 images par seconde, on supprime le scintillement (2).

En revanche, le papillotement est un phénomène d'ordre géométrique. Il est produit pour le mouvement des objets éclairés d'une manière discontinue. Pour éviter ce phénomène, il est nécessaire d'augmenter le nombre d'images intermédiaires entre 2 positions de l'objet. On perçoit d'ailleurs en cinéma ce phénomène de papillotement lors de panoramiques trop rapides sur un décor comportant des verticales.

La vision des couleurs Les couleurs du spectre

Newton (1666) a décomposé la lumière blanche solaire à l'aide d'un prisme et a obtenu ainsi un spectre qu'il a d'abord réparti —



Limite de résolution de l'œil ($\alpha = 1'$)

de façon tout à fait arbitraire — en 5 couleurs : le rouge, le jaune, le vert, le bleu et le violet et a ajouté ensuite 2 autres couleurs : l'orangé et l'indigo, le spectre comprenant alors 7 couleurs. Ce sont des couleurs dites couleurs pures, chacune étant caractérisée par une longueur d'onde (voir tableau). Aux couleurs pures on oppose les couleurs complémentaires. Celles-ci produisent, par leur association avec une couleur pure, la sensation de blanc à l'œil. En photographie on a l'habitude de décomposer le spectre visible en 3 groupes, avec les couleurs pures suivantes : rouge, vert et bleu et, respectivement, les complémentaires jaune, magenta et cyan.

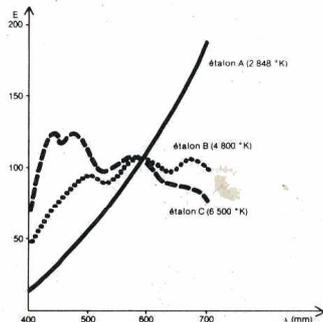
La lumière blanche est la lumière fournie par l'illuminant naturel, le soleil, autrement dit toute lumière analogue à la lumière du jour. Toutefois, différents illuminants artificiels fournissent une lumière qui est ressentie comme blanche. Voici les caractéristiques physiques des « sources de lumière blanche » utilisées en colorimétrie, définies dès 1931 par la « Commission Internationale de l'Éclairage » (C.I.E.) ; trois sources étalons appelées « illuminant A, illuminant B et illuminant C ».

1. **Illuminant A** : c'est le rayonnement fourni par une lampe à filament de tungstène incandescent dans une atmosphère gazeuse, sa température de couleur étant égale à 2848 °K (3).

2. **Illuminant B** : l'illuminant B est constitué par la combinaison de l'étalon A avec un filtre liquide approprié (filtre Davis-Gibson). Sa température de couleur est égale à 4800 °K, ce qui correspond en fait à la lumière

provenant directement du soleil.

3. **Illuminant C** : il résulte également de l'illuminant A associé à un filtre qui absorbe les grandes longueurs d'onde (rouge). Sa température de couleur de 6500 °K correspond à la moyenne des températures de couleur du ciel bleu (voir schéma).



Illuminants standard. Répartition énergétique des sources étalons définies par la C.I.E.

Les 3 caractéristiques d'une couleur

Une couleur est définie par trois éléments à savoir :

- La longueur d'onde dominante ;
- L'intensité de la radiation ;
- La pureté ou saturation (c'est-à-dire l'« évolution » d'une teinte vers le blanc ou sa pâleur : plus une couleur est pâle, moins elle est pure). L'œil distingue donc pour définir correctement une couleur, la teinte, l'intensité et la pureté. On peut faire trois remarques à partir de là :
- tout d'abord l'œil définit d'une certaine manière une sensation colorée parce que l'enseignement, l'éducation ou encore l'habitude lui commande d'appeler cette sensation rouge, jaune, bleue, violette, etc... ;
- ensuite, l'œil perçoit cette teinte qui paraît plus ou moins

lavée de blanc (facteur de pureté) ;

• enfin, cette sensation paraît à l'œil de façon plus ou moins violente. On peut donc affirmer que l'œil ne situe que très progressivement les différences de qualité (teinte et pureté) ainsi que les différences d'intensité. Son usage en tant qu'instrument de mesure ne peut donc donner que des résultats très approximatifs.

Il est également intéressant de noter que chaque couleur produit un effet psychologique assez marquant (le bleu symbolise pour beaucoup la notion d'espace, de profondeur, de calme et de froid alors que le vert indique davantage le repos et l'équilibre, etc.). Enfin, les contrastes violents de 2 couleurs modifient la vision de ces couleurs : par exemple, le jaune paraît beaucoup plus vif sur fond noir (de même que le rouge) alors que le bleu perd en vivacité sur fond noir et réciproquement sur fond blanc. Autre exemple : si l'on place deux plages de même couleur sur une feuille moitié blanche moitié noire, la couleur de la plage placée sur fond noir donnera l'impression d'être plus claire que celle de la plage mise sur fond blanc. Autrement dit, la couleur apparente d'un objet varie selon la couleur du fond sur lequel il se place. Si l'on filme par exemple un paysage à l'intérieur d'un local, en contre-jour, de façon que l'intérieur soit très sombre, les couleurs de ce paysage paraîtront alors beaucoup plus saturées. Il en est de même lorsque l'on regarde une image sur le dépoli d'un réflecteur.

Yves Angéolo

(1) Il faut également savoir que le pouvoir séparateur croît avec le contraste et avec l'éclairement.

(2) C'est l'une des raisons pour lesquelles aux Etats-Unis cette fréquence de 24 im/s a été adoptée dès les premiers films parlants.

(3) Lorsqu'une lumière à la même composition spectrale que celle du « corps noir » porté à la température T exprimée en degré Kelvin, cette température T° K est appelée « température de couleur » de la source lumineuse.