



**Cours Jean-Marie Guinot
1970-1972**

OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE

La peinture n'est pas l'oeuvre des mains,
mais l'oeuvre des yeux de l'artiste.

MICHEL ANGE

On réserve le nom de lumière à l'agent physique qui constitue le mode usuel et normal d'excitation de la rétine.

Pour les psychologues la lumière est le stimulus adéquat de l'organe visuel.

La sensibilité de l'oeil à la lumière est assez limitée, nous ne voyons que dans un intervalle de 4.000 Å à 7.000 Å ce qui correspond à peu près au centième de l'espace des longueurs d'onde explorées actuellement. Nous sommes comme ces poissons qui vivent entre deux eaux, ignorant ce qui se passe au-dessus et au-dessous d'eux.

Les vertébrés possèdent des yeux bâtis tous sur le même modèle.

Chez la plupart des invertébrés les organes récepteurs sont tellement divers que seule la sensibilité à la lumière permet de parler de récepteurs.

Dernièrement (1963) la grande presse s'emparait d'expériences faites par des psychologues russes puis américains, explorant la vision extra-rétinienne. Alors que Jules ROMAINS avait réalisé en 1920 des expériences bien plus variées et d'une autre ampleur (constatées par BERGSON et Anatole FRANCE) devant une commission de médecins spécialistes réunis à l'Hôpital Cochin.

Jules ROMAINS de même que les chercheurs actuels expliquent ce phénomène par la présence d'ocelles dans l'épiderme particulièrement serrés en certains points, tels que le bord des narines et le bout des doigts.

L'image rétinienne est renversée. Un simple tracé dans l'oeil schématisé nous le montre. L'éducation du cerveau nous permet de voir les images droites.

Les psychologues ont montré que le redressement des images était une question d'éducation du cerveau. En faisant porter à des sujets des lunettes avec prismes inverseurs, les objets étaient vus renversés pendant quelques jours, puis vus dans leur vrai sens, quand le sujet s'était habitué à la présence de tels prismes.

DESCRIPTION DE L'OEIL (1)

--:-

Volume 7 à 8 cm³
Poids : 8 grammes

L'oeil est constitué par trois membranes :

- la sclérotique
- la chorofde
- la rétine

L'intérieur du globe est composé par l'humeur vitrée, l'humeur aqueuse, le cristallin et l'iris.

I - LA SCLEROTIQUE

Membrane fibreuse solide et étanche, de forme approximativement sphérique, qui enveloppe l'appareil oculaire.

La partie antérieure est la cornée, incolore et transparente ; c'est une sorte de hublot permettant aux rayons lumineux de pénétrer dans l'oeil en leur faisant subir la première des réfractions qui entraînent la formation des images sur la rétine qui analyse l'image.

La cornée est formée de tissu vivant, de fibres et de cellules conjonctives, recouverte sur ses deux faces postérieure et antérieure d'un endothélium et d'un épithélium. La cornée est un des rares exemples de tissu sans circulation sanguine.

(1) Voir Y. Le GRAND - Optique physiologique II.

En cas de blessure, la régénération est presque impossible, seules de très petites lésions peuvent se réparer sans nuire à la vision.

En cas d'infection ou de blessures graves (brûlure par chaux vive ou acides) des vaisseaux sanguins pénètrent dans la membrane diaphane pour y apporter les éléments anti-infectieux et réparateurs nécessaires à la guérison.

La cicatrice laisse des traînées opaques comme sur la peau, la fenêtre devient dépolie ou même opaque. Dans le cas de cécité totale, une intervention chirurgicale s'impose : c'est la greffe de la cornée. Le matériel de greffe est pris sur un cadavre dans les douze heures, l'organe n'étant pas mort peut vivre encore soixante heures dans du sérum physiologique, conservé dans une glacière.

Dans certains cas, la greffe de l'oeil est inutile, étant vouée à un échec ; il existe alors une série d'opérations qui permettent dans certains cas de réaliser une fenêtre transparente dans un oeil rendu aveugle par des lésions cicatricielles opaques de toute sa partie antérieure.

L'épaisseur de la sclérotique est maximum vers la cornée : 1 mm environ, vers l'équateur à la partie postérieure : 0,6 mm. La cornée de l'homme contient 7,5 % d'eau, elle est revêtue d'un tissu qui protège contre les larmes.

La face antérieure de la cornée est de révolution en général. Quand elle ne l'est pas elle conserve deux plans de symétrie nécessairement rectangulaires, l'oeil est astigmat.

II - LA CHOROÏDE

C'est une chambre chaude à large irrigation, qui maintient et protège la rétine, organe essentiel de la vision.

La choroïde tapisse la sclérotique à l'intérieur.

Les deux membranes se séparent à la partie antérieure de l'oeil, le prolongement de la choroïde forme l'iris, diaphragme percé d'un trou circulaire qui est la pupille.

En arrière de l'iris est le cristallin, lentille que nous verrons en détail. Le prolongement de la choroïde est la zonule qui vient s'insérer sur le pourtour du cristallin en une membrane qui joue un rôle important dans l'accommodation. Le cristallin et la zonule séparent la cavité de l'oeil en deux chambres qui ne communiquent pas.

La chambre antérieure remplie par l'humeur aqueuse, liquide qui contient 2 % de matières solides dissoutes dans l'eau (en particulier du sel); elle se reforme très vite quand l'oeil est crevé. L'humeur aqueuse baigne l'iris. Entre l'iris et le cristallin, à la partie périphérique, est la chambre postérieure.

Le volume de la chambre antérieure peut être altéré, soit dans une perforation de la cornée par ulcérations ou par traumatisme, le volume diminue et l'iris au lieu d'être dans un plan vertical bombe en avant, soit par une augmentation de pression arrière : glaucome (hypertension oculaire permanente) ou cataracte traumatique intumescence. S'il y a une augmentation de pression en avant ou diminution de pression en arrière (issue du vitré dans une perforation de la sclérotique) l'iris paraît concave en avant.

Entre le cristallin et la rétine, se trouve le corps vitré, masse gélatineuse transparente qui est composée d'humeur aqueuse et d'eau, à la consistance du blanc d'oeuf, au volume: 5 cm³, contient environ 7.10^{-3} g de chlorure de sodium nécessaire à l'équilibre osmotique des humeurs.

III - LA RETINE

Sur le fond de l'oeil en avant de la choroïde, s'épanouit le nerf optique dont les terminaisons modifiées constituent la rétine protégée par la sclérotique, nourrie et chauffée par la choroïde : épaisseur : 0,2 mm.

- Structure

Elle se compose d'une mosaïque dont chaque élément est relié à une fibre nerveuse.

C'est une réunion de cellules d'où part le nerf optique, qui transmet les impressions au cerveau.

Cette mosaïque forme une surface sensible à la lumière. Avec la chorofide, elles font défaut à l'endroit où le nerf optique perce (tache aveugle de Mariotte) ; cette région s'appelle papille ou punctum caecum.

La couche pigmentaire se compose de grosses cellules hexagonales, sur lesquelles sont implantés plusieurs cônes ou bâtonnets. Quand un animal est sacrifié à l'obscurité il n'y a pas d'adhérence entre la couche des bâtonnets et des cônes et la couche pigmentaire.

Au contraire, quand l'animal est sacrifié à la lumière, des prolongements pigmentés produisent une soudure énergique des deux couches en étranglant les cônes.

La rétine est un véritable laboratoire dont les multiples appareils savent s'adapter à la nature des radiations lumineuses, à la quantité de lumière reçue, se reposer, se sensibiliser ou se protéger.

Membrane de 300 microns d'épaisseur, parfaitement transparente, au point que le globe énucléé et ouvert nous ne la voyons pas et que les rayons des ophtalmoscopes la traversent à l'aller et au retour sans nous en donner l'image. C'est là que se passent des phénomènes physiques et physico-chimiques, dont l'aboutissement sera l'influx nerveux.

- Divisions de la rétine

1°- L'aire centrale : 5 à 6 mm de diamètre.

a) L'entonnoir fovéal de 1,5 mm de diamètre : c'est une dépression qui occupe le milieu de l'aire centrale ; elle n'a que des cônes et pas de bâtonnets (25.000 cônes).

Le centre correspond au point de fixation : on l'appelle aussi fovea centralis ou fossette centrale. Au fond central de la minuscule région qu'est la macula (150 à 200 microns de diamètre) on compte à peu près 100 cônes. C'est en ce point que se fait la plus grande distinction de détails possible. On a là une région d'acuité visuelle maximum. Plus il y a de cônes dans une région, plus cette région est susceptible de discerner de fins détails.

b) la parafovea : anneau de 0,5 mm de largeur, caractérisée par une énorme accumulation de cellules ; là commencent les bâtonnets.

c) La périfovea : anneau de 1,5 mm de largeur ; les bâtonnets sont dans la même proportion que dans le reste de la rétine.

2°- La rétine périphérique, qui comprend le restant de la rétine. Ces deux régions, quoique de surfaces relatives dans le rapport de 1 à 40 environ contiennent à peu près autant de cellules ganglionnaires l'une que l'autre.

On distingue trois régions :

- a) la proche périphérie, anneau de 1,5 mm de largeur
- b) la moyenne périphérie : 3 mm de largeur,
- c) la périphérie éloignée : 10 mm.

Tache aveugle

Nous avons vu qu'à l'endroit où le nerf optique débouche, nous sommes démunis de cônes et de bâtonnets. N'ayant aucun élément sensible, cette portion de la rétine est aveugle. Nous ne la voyons pas avec la vision binoculaire ; un point de l'espace ne peut avoir en même temps ses images sur la tache aveugle de chaque oeil ; quand une image se forme sur la tache aveugle de l'oeil droit, l'oeil gauche voit l'objet.

D'autre part, en vision monoculaire, un objet ayant son image sur la tache aveugle, n'est pas dans une direction norma-

le du regard. Nous ignorons cette infirmité. Il nous est difficile de fixer notre oeil sur un point, le regard se promène constamment ; d'autre part en vision périphérique, les images sont très peu nettes.

Il est cependant facile de situer la tache aveugle en vision monoculaire : un objet situé à peu près à 20° à droite de l'axe de visée, si nous regardons avec l'oeil droit, disparaît du champ.

La tache aveugle n'est pas circulaire, son diamètre apparent est environ 4° . On pourrait à peu près y loger 12 pleines lunes à la file.



Phénomènes entoptiques

Ce sont des phénomènes de perception de corps opaques contenus dans l'appareil oculaire lui-même. Ce phénomène n'a lieu généralement que quand on regarde le ciel, les particules opaques projettent une ombre sur la rétine.

Mouches volantes

Si la surface éclairante est large, le cône d'ombre sera court ; si nous regardons une surface lumineuse étendue, nous ne percevons que l'existence des opacités très voisines de la rétine.

Si la surface est punctiforme, il y a formation d'un cône d'ombre ayant pour sommet le point lumineux qui porte ombre à toute distance sur un écran ; l'ombre sur la rétine est très nette, on voit toutes les irrégularités se dessiner parfaitement.

La coupe de la rétine fait apparaître 10 couches dont deux seulement nous intéressent.

- L'épithélium pigmentaire

C'est une mosaïque formée d'une rangée de cellules plates jointives de 15 microns de diamètre moyen, au contour polygonal, contenant du pigment absorbant noir sous la forme de grains ronds et d'aiguilles. La teneur en pigment varie d'un sujet à l'autre ; il est peu abondant chez les sujets blonds et absent chez les albinos. Ce pigment se décolore après une exposition lumineuse intense et prolongée.

On s'est parfois demandé si le pigment ne jouait pas un rôle actif dans la vision en dehors de l'amélioration de l'image par absorption des diffusions parasites, mais les albinos s'en passent ; d'autre part un décollement rétinien qui sépare les cellules visuelles de l'épithélium, laisse subsister la vision.

Rétine diurne : fovea - niveaux élevés et vision colorée.

Rétine nocturne : faible lumière
vision incolore

- Cônes et bâtonnets

se différencient surtout par leur segment externe qui est constitué par un empilement de disques d'épaisseur 0,5 micron environ.

Les bâtonnets ont 50 à 60 microns de long et 5 microns d'épaisseur ; ils se composent d'un segment externe et d'un interne reliés par un corpuscule lentiforme ; chez l'homme, les deux segments ont à peu près le même volume et la même longueur. Dans le segment externe se trouve une substance rouge, l'érythroopsine qui sous l'action de la lumière devient jaune, puis blanche. On l'appelle aussi pourpre rétinien.

Les cônes ont également deux segments, le segment interne a 20 microns de long, la longueur totale étant 30 microns environ. La largeur des cônes est très variable chez un même individu : 3 à 6 microns.

La couche des cônes et des bâtonnets est la couche sensible, ces organes étant les organes terminaux des fibres du nerf optique.

La rétine a 6 millions de cônes et 130 millions de bâtonnets. Le nerf optique n'ayant que 800.000 fibres, il faut admettre la théorie des cellules centrales.

(Le nerf auditif n'a que 15.000 fibres).

Les bâtonnets assurent la vision crépusculaire scotopique, celle des radiations courtes tandis que les cônes président à la vision des couleurs. PARINAUD pour soutenir du point de vue physiologique cette différenciation, s'appuyait sur l'absence d'adaptation au centre de la macula ; dans cette région où ne se rencontrent que des cônes, il n'y a pas de pourpre ; le pourpre est donc l'élément chimique nécessaire à l'adaptation ; il existe dans les bâtonnets : ceux-ci sont donc les organes de l'adaptation.

Dès le 18^e siècle, on a remarqué la coloration jaune de la région fovéale et de ses alentours, ce qui la fit nommer tache jaune.

Cette couleur persiste plusieurs jours sur un oeil maintenu à basse température, mais se détruit en quelques minutes sous l'action de l'alcool. Le pigment jaune maculaire peut s'extraire à la benzine et au chloroforme, ce qui permet d'étudier son spectre d'absorption ; on a identifié ce pigment à la xanthophylle des feuilles d'arbres.

- Le pourpre rétinien ou erythropsine

est constitué surtout de vitamine A, qui est un alcool organique dérivé d'un carbure d'hydrogène nommé Carotène.

Sous l'action de la lumière, le pourpre rétinien se décompose en donnant une substance jaune appelée rétinène, qui est un aldéhyde de la vitamine A.

Inversement, la vitamine A reconstitue le pourpre dans

l'obscurité, mais il s'en perd toujours un peu, si bien qu'un apport est nécessaire ; il se fait par le sang.

LE CRISTALLIN

poids : 0,29 g - est enfermé dans une membrane sans issue, la capsule du cristallin. Il évolue durant toute la vie, de nouvelles couches venant se superposer aux anciennes comme la peau d'un oignon.

Avec l'âge, il peut se produire des opacités (cataractes : ablation du cristallin).

L'extraction du cristallin opacifié est une opération très ancienne, puisque les Hindous et les Egyptiens la pratiquaient de nombreux siècles avant notre ère, mais faute d'asepsie, le malade perdait l'œil le plus souvent.

Le cristallin a la faculté de se déformer sous l'action de certains muscles situés à l'intérieur de l'œil, ce qui permet au système optique de former exactement sur la rétine l'image des objets regardés, quelle que soit leur distance.

Le cristallin est une lentille transparente dénué du moindre nerf et du moindre vaisseau sanguin.

L'indice de réfraction du cristallin varie d'une zone à l'autre. Il est de l'ordre de 1,40 à 1,41 au centre, 1,38 à 1,39 aux pôles de l'écorce et de 1,37 à 1,38 à l'équateur. Ceci montre que la convergence du cristallin est due non seulement à la courbure de ses faces, et à celle de son noyau, mais aussi à son hétérogénéité, qui lui permet d'avoir une convergence plus élevée que celle donnée par sa courbure.

L'œil ne fonctionnant pas dans les conditions d'approximation de Gauss, le diamètre pupillaire étant loin d'être négligeable par rapport aux rayons de courbure de la cornée et du cristallin, il est donc entaché d'aberrations sphérique et chromatique.

Aux diamètres pupillaires normaux, l'aberration sphérique de l'œil n'est guère gênante et tout se passe pratiquement

comme si l'oeil était stigmatique.

Durant l'accommodation la partie axiale du cristallin augmente de convergence plus rapidement que sa partie périphérique.

Au lieu d'augmenter de convergence uniformément le cristallin porte son maximum d'efforts sur sa partie axiale au détriment de sa partie périphérique et la pupille se contracte pour obturer justement la partie périphérique du cristallin et ne laisser découverte que sa partie axiale.

L'axe du cristallin ne se confond pas avec l'axe de la cornée, l'oeil n'est donc pas un système centré.

On appelle axe optique de l'oeil une normale à la surface de la cornée au centre de la pupille.

On appelle α l'angle que fait l'axe optique avec l'axe de visée. Chez l'adulte, il est d'environ 5° ; chez l'enfant, α est très grand.

L' I R I S

est un diaphragme contractile qui limite l'admission de la lumière. L'iris est percé de la pupille, son centre se déplace du côté de la tempe quand la pupille se dilate.

Les muscles de l'iris permettent de faire varier le diamètre pupillaire, qui sera de l'ordre de deux millimètres aux forts éclaircissements diurnes mais peut dépasser 8 mm dans l'obscurité.

Le chat, qui a une pupille allongée au lieu d'être ronde, peut la réduire à n'être plus qu'une fente très fine. Chez le cheval, les yeux sont grands, à fleur de tête, leur prunelle a la forme d'un rectangle horizontal. Leur vue est excellente de jour comme de nuit.

La volonté n'a pas d'action sur l'iris, mais on peut dilater ou rétrécir la pupille par des médicaments. On utilise

surtout la belladone (atropine) qui la dilate pour examiner le fond de l'oeil. Les mouvements de la pupille sont relativement lents on peut le voir par l'expérience suivante : on laisse le patient dans l'obscurité pendant quelques minutes, brusquement on produit une lumière intense ; on constate que la pupille est dilatée, elle se rétrécit en un temps qui varie de 0,5 à 2 secondes. C'est la cornée qui nous fait voir la pupille plus grande qu'elle ne paraît. On peut supprimer la déformation cornéenne en observant l'oeil sous une couche d'eau.

L'iris n'est pas un tissu tendu à plat, il présente un relief que l'on peut comparer avec celui du cratère d'un volcan, dont le centre serait la pupille. La partie en pente, qui va du centre au sommet circulaire du cratère se nomme la collerette, le sommet circulaire du cratère, la crête.

Constantes de l'oeil

Axe vertical : 23 mm
Distance entre le pôle antérieur et la rétine : 23,5 mm
Rayon de courbure de la cornée : 8 mm

La cornée n'étant pas exactement sphérique, à certains endroits, on peut l'assimiler à une sphère ; au sommet de la cornée, la zone optique est à peu près centrée sur la pupille.

En vision diurne, la pupille étant très fermée, les rayons lumineux formant l'image passeront tous par cette zone optique.

Rayon de courbure de la face extérieure de la cornée : 6,5 mm
Face antérieure du cristallin :
R = 10,2 T = 1,4 dispersion

Indice de réfraction pour la raie D du sodium

Cornée	1,3771	
Humeur aqueuse	1,3374	
Corps vitré	1,336	
Couche externe	1,375	à 1,41
Eau	1,33	

L'axe du cristallin ne se confond pas avec l'axe de la cornée, l'oeil n'est donc pas un système centré.

On appelle axe optique de l'oeil une normale à la surface de la cornée au centre de la pupille.

Oeil schématique

On appelle oeil schématique un oeil dont les dimensions sont les moyennes d'un très grand nombre de mesures sur des individus différents. (voir schéma p. 19)

Calculons les caractéristiques d'un tel système.

Dioptre cornéen :

$$\text{On a : } n = 1 \quad n' = 1,33$$

$$\text{focale antérieure } f = \frac{n R}{n' - n} = \frac{8}{0,33} = 24,24$$

$$\text{focale postérieure } f' = \frac{n' R}{n' - n} = \frac{1,33 \times 8}{0,33} = 32,24$$

Cristallin isolé :

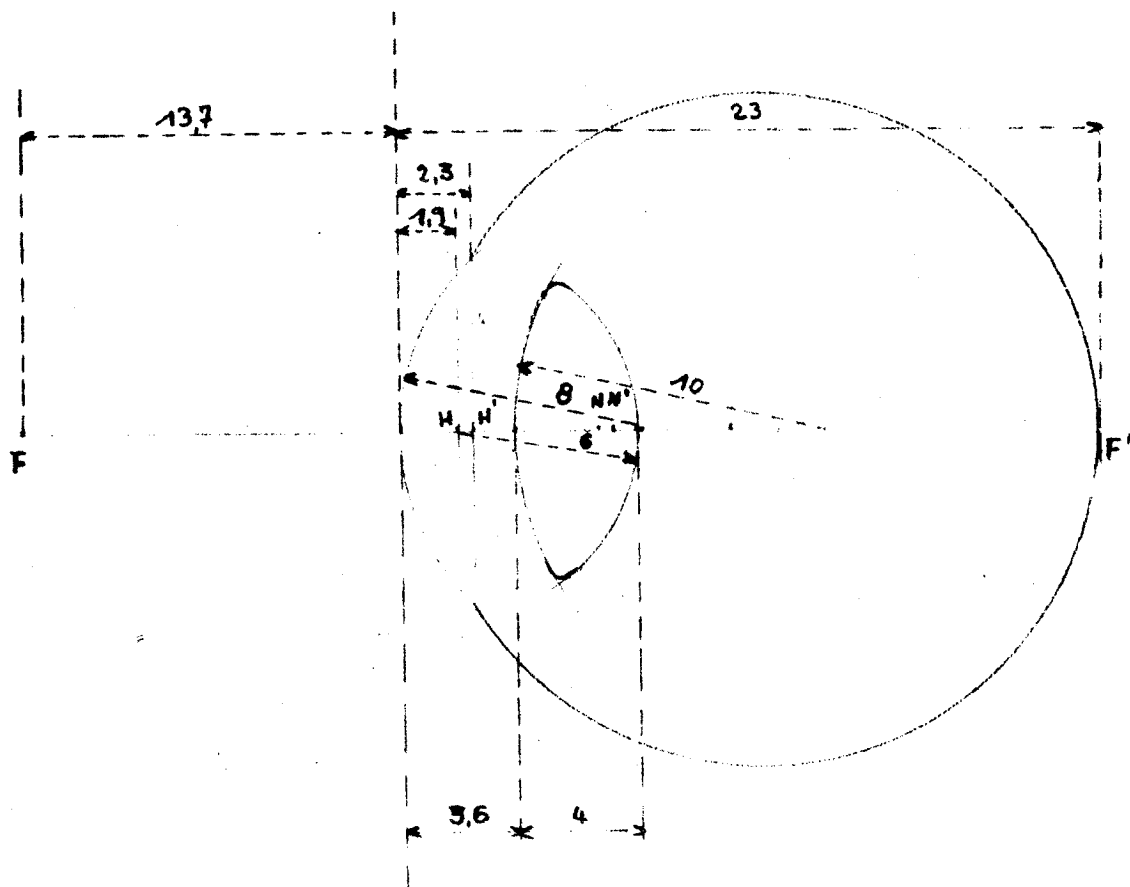
$$R_1 = 10 \quad R_2 = 6 \quad d = 4 \quad n = 1,42 : 1,33 = 1,068$$

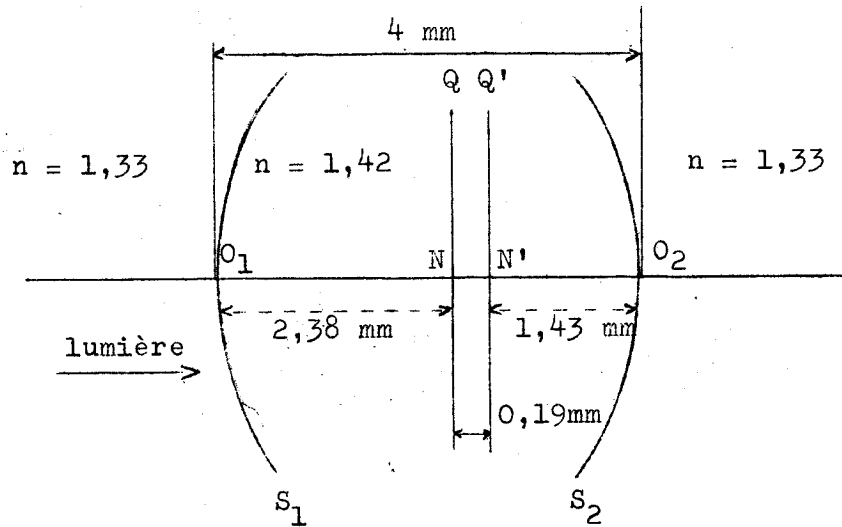
comme les milieux extrêmes sont identiques, les points nodaux N, N' sont dans les plans principaux Q, Q' ; les distances focales sont égales.

$$R = n (R_2 + R_1) + d (n + 1) = 16,82$$

$$S_H = - \frac{R_1 d}{R} = 2,38 \quad S_{H'} = - \frac{R_2 d}{R} = - 1,43$$

$$\overline{O_1 N} = 2,38 \quad \overline{O_2 N'} = 1,43 \quad \overline{NN'} = 0,19$$





La distance focale est :

$$f = \frac{n R_1 R_2}{(n - 1)R} = 56,21$$

- Caractéristiques de l'oeil entier

Position des foyers

1°- Un faisceau parallèle en avant de la cornée converge à 32,24 en arrière de la face antérieure de la cornée qui est à 3,6 de la face antérieure du cristallin c'est-à-dire à $3,60 + 2,38 = 5,98$ du plan principal antérieur.

Un faisceau de rayons parallèles en avant de la cornée converge à $32,24 - 5,98 = 26,26$ en arrière du plan principal antérieur Q du cristallin.

Si nous appliquons la formule des lentilles convergentes:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

$$- \frac{1}{26,26} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{56,21} \quad p' = 17,90$$

Le point de convergence F' est donc à 17,90 du plan principal postérieur Q' du cristallin.

$17,90 - 1,43 = 16,47$ de la face postérieure S_2 du cristallin.

$16,47 + 7,60 = 24,07$ de la face antérieure de la cornée.

2°- Un faisceau de rayons parallèles dans le corps vitré se propageant vers la cornée converge à 56,21 en avant du premier plan focal principal Q , à $56,21 - 2,38 = 53,83$ de la face antérieure S_1 du cristallin, à $53,83 - 3,60 = 50,23$ en avant de la cornée.

Le dioptre formé par la cornée rabat les rayons et les fait converger en un point donné par la formule

$$\frac{24,24}{p} + \frac{32,24}{p'} = 1$$

$p' = - 50,23$ on trouve $p = 14,78$

Oeil réduit

Un système optique dont les distances focales sont inégales ne peut être remplacé par un dioptre unique, à moins que ses plans principaux, par conséquent ses points nodaux, soient confondus. Dans ce cas, le dioptre équivalent est tangent au plan principal double, son centre de courbure coïncide avec le plan nodal double qui devient centre optique. On détermine l'indice par la condition que les foyers du système et dioptre équivalent coïncident. Cette équivalence subsiste approximativement quand les plans principaux sont très voisins. Cherchons le dioptre équivalent à l'oeil.

Nous placerons sa surface à

$$1,75 + \frac{0,32}{2} = 1,91 \text{ en arrière}$$

de la face antérieure de la cornée, c'est-à-dire à égale distance des plans principaux. Nous prendrons pour rayon la distance d'un plan principal au point nodal correspondant, soit 5,47.

Enfin, nous déterminerons l'indice par la condition que le foyer antérieur soit à la distance :

$$14,78 + 1,91 = 16,69$$

de la face du dioptre.

La formule donne 1,328

La distance du foyer postérieur est 22,16 ; il coïncide avec le foyer de l'oeil schématique.

Oeil réduit de Listing

c pôle de la cornée

F foyer antérieur

rayon de courbure du dioptre = 5 mm

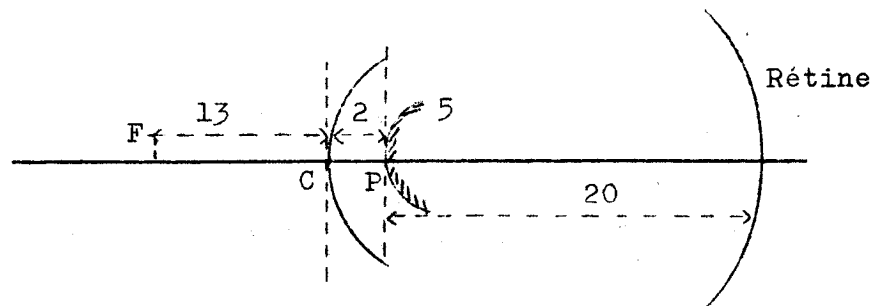
longueur totale de l'oeil = 22 à 23 mm

l'oeil réduit est un appareil photo objectif

le cristallin
60 dioptries

foyer 17 mm

$$f = \frac{1}{60} = 17 \text{ mm}$$



surface sensible : rétine quelques mm²

diaphragme : iris de 2 à 8 mm

puisque $f = 17$, l'ouverture est à peu près de $f/8$ à $f/2$

Condition de vision nette :

La condition pour que l'oeil donne une vision nette est qu'il se forme sur la rétine une image réelle nette.

Cette condition a été prouvée par les observations que l'on a faites à l'ophtalmoscope ; on avait déjà vu au moyen d'une fenêtre pratiquée dans la sclerotique sur les yeux énucléés que des images nettes de l'infini se produisent sur la rétine. C'est le jésuite SCHEINER en 1619 qui fit le premier cette expérience.

On a admis que pour que deux points lumineux soient vus d'une manière distincte, il faut que ces deux points soient distants de $5/17.000$ de μ soit $1/3.000$ de manière à ce que leurs images se forment sur deux éléments nerveux distincts.

A une distance de 3 km il est possible de voir deux points distants de 1 m. On peut voir des détails de 3 mm à une distance de 10 m sur l'écran cinématographique, ces chiffres sont relatifs à un éclaircissement de 10 à 50 lux.

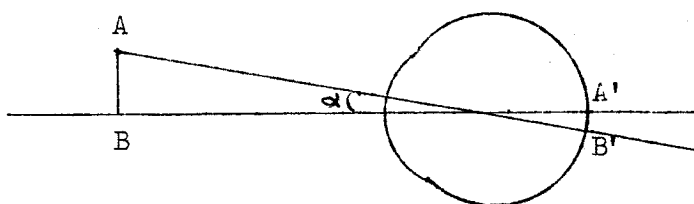
Le pouvoir séparateur est plus petit en lumière jaune, plus grand en lumière violette. En lumière jaune on voit moins bien les détails.

- Pouvoir séparateur ou acuité visuelle

On appelle angle limite le plus petit angle nécessaire à la distinction de deux points séparés.

Il faut que le diamètre apparent soit supérieur à une certaine valeur ϵ qui définit l'acuité visuelle ou le pouvoir séparateur de l'oeil.

On le détermine en éloignant progressivement une mire millimétrique de l'oeil, cette mire a des traits égaux aux intervalles. Quand les traits se confondent en une teinte uniforme, nous faisons les mesures.



Si D mm est la distance de l'oeil à la mire, on a :

$$\varepsilon = \frac{I}{D} \text{ radian} \quad \text{On trouve que :}$$

$$\varepsilon \neq \frac{1}{3.000} \neq 3 \times 10^{-4} \neq \text{arc } 1'$$

D'après cela deux points placés à une distance D de l'oeil sont vus séparés si leur distance y vérifie la condition

$$\frac{y}{D} \geq 3 \times 10^{-4} \quad \text{ou} \quad y \geq 3 \times 10^{-4} D$$

Un objet ou un paysage indépendamment des questions de couleur et ne contenant pas de points lumineux peuvent être considérés comme un assortiment de plages dont chacune est caractérisée par une certaine brillance. Dans la mire de Foucault (formée de traits noirs séparés par des intervalles blancs, de telle manière que tous les traits, noirs et intervalles blancs aient la même largeur) on a seulement deux brillances, l'une nulle, l'autre assez élevée sans être éblouissante. Dans la nature, la valeur de la brillance maximum peut, selon les cas, être très grande ou extrêmement petite ; les valeurs des brillances jouent un rôle capital dans la visibilité.

Le contraste (écart en valeur relative entre les brillances des diverses plages) intervient aussi, nous le verrons plus en détail.

L'étude de la limite de séparation de l'oeil a été effectuée le plus souvent en fonction de deux variables, le contraste et la brillance de l'objet.

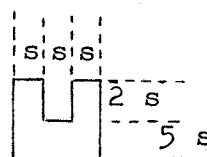
(Pour la vision dans les instruments il faut faire intervenir un autre facteur : le diamètre de la pupille d'entrée de l'oeil).

La limite de séparation pour l'oeil est extrêmement variable et complexe, difficilement accessible au calcul, parce que faisant intervenir des phénomènes physiologiques dont les causes sont mal connues. Le système optique de l'oeil pourra être considéré comme parfait pour des ouvertures pupillaires suffisamment réduites.

La mire de Foucault n'est pratiquement pas utilisée dans les recherches sur le pouvoir de résolution de l'oeil.

Le Professeur Yves Le GRAND propose les mires suivantes:

1°- Les optotypes ou dessins dont il faut reconnaître la forme : lettres, anneaux brisés de Landolt



ou crochet de Snellen

L'observateur doit reconnaître la forme, mais aussi indiquer dans quelle direction est l'ouverture du crochet ou de l'anneau. On définit le pouvoir de reconnaissance ou acuité par l'inverse de l'ouverture angulaire minimale "s" du crochet ou de l'anneau, "s" étant exprimé en minutes

$$V = \frac{1}{s}$$

On a proposé aussi l'emploi de figures constituées par des

points dont il faut dire le nombre mais cette méthode mesure plutôt le seuil des mouvements oculaires nécessaires pour fixer successivement et compter les points.

L'acuité visuelle ainsi mesurée varie selon les sujets: en moyenne, on ne reconnaît plus les optotypes vus sous un angle inférieur à 4 ou 5 minutes, mais l'angle limite de certains sujets peut être notablement plus faible.

2°- IVES a utilisé des mires à période réglable en superposant deux trames identiques, les moirages obtenus variant avec l'angle des traits. Le pouvoir séparateur ainsi mesuré atteint 1 minute environ dans les meilleures conditions. On peut employer aussi deux fils noirs seulement, sur fond blanc, on voit mieux de près que de loin, sous un diamètre apparent égal.

y aura sa plus petite valeur quand D sera égal à la distance minimum de vision distincte soit 25 cm et par suite la plus petite longueur perceptible à l'oeil nu est :

$$3 \times 10^{-4} \times 25 \text{ cm} = 75 \times 10^{-4} \text{ cm} = 0,075 \text{ mm}$$

On peut dire encore que 2 points sont distingués par l'oeil quand la distance qui sépare leurs images sur la rétine est supérieure à

$$3 \times 10^{-4} \times 17 \text{ mm} = 5 \times 10^{-3} \text{ mm} = 5 \text{ microns}$$

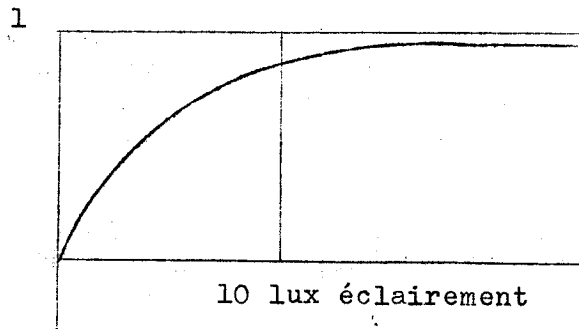
$$17 \text{ mm} = \text{focale cristallin.}$$

Or le diamètre d'un élément rétinien est lui-même de l'ordre de 4 à 5 microns, deux points sont donc vus séparés quand la distance de leurs images est au moins égale au diamètre d'un élément rétinien, c'est-à-dire les 2 points se forment sur 2 cônes différents non voisins afin de donner lieu à deux sensations et qu'il n'y ait pas de continuité.

Cette grandeur croît quand on s'éloigne de la ligne de fixation.

(Imperfection utilisée chez les pointillistes - procédés Dufaycolor et Lumière).

Variation avec l'éclairage



Pour 10 lux on arrive tout près de l'acuité 1, elle varie très lentement pour les fortes lumières. Quand la lumière est trop faible pour exciter une seule cellule, plusieurs cellules se mettent en batterie et envoient leur influx à une cellule centrale qui somme les impressions reçues par l'ensemble de ces cellules.

Prenons un test peu éclairé et avant de le regarder, fixons un fond très éclairé.

1°- A basse lumière on diminue l'acuité - les éléments sensibles sont fatigués par la lumière vive.

2°- Si nous prenons une lumière intense pour le test, l'acuité sera augmentée par l'adaptation à la lumière.

Sensibilité à la lumière

La rétine est sensible à $\frac{1}{90.000}$ de l'éclairement du papier blanc produit par la pleine lune ou à une bougie à quelques km, c'est-à-dire à :

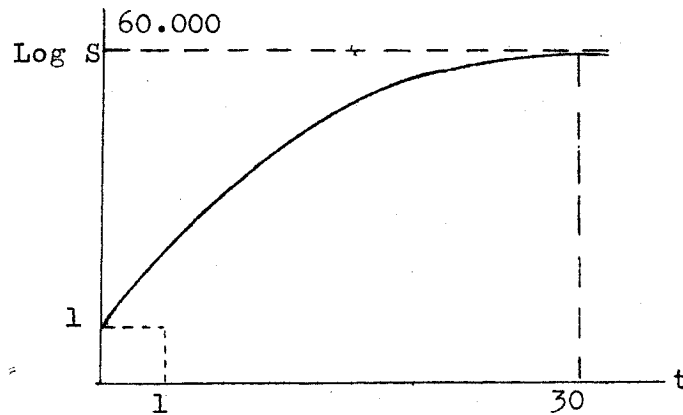
$$10^{-8} \text{ erg/sec/cm}^2$$

pour un oeil progressivement adapté.

Au contraire, un oeil habitué à la lumière du jour ne peut percevoir qu'une bougie-mètre (1 lux).

La sensibilité est double au bout d'une minute et continue à augmenter pendant quelque temps.

L'adaptation à la lumière est due à l'action de l'iris et à la sécrétion intérieure (pourpre rétinien).



L'acuité varie différemment avec l'intensité suivant la lumière employée. Les coefficients d'égale acuité sont égaux à 1 jusqu'à :

$$\lambda = 5070 \text{ Å}$$

A partir de ce point, les radiations bleues prennent la prépondérance, le pouvoir séparateur augmente.

De 10 à 100 lux, l'acuité varie très peu mais le phénomène de Purkinje intervient. L'acuité passe par un maximum de finesse entre 10 et 15 ans, puis décroît avec l'âge.

Aberrations de l'oeil

Quand on fixe son attention sur un point pour lequel on n'accorde pas exactement, il se forme sur la rétine une tache de diffusion ; cette tache n'est pas uniformément éclairée

et tous les observateurs voient une série de taches ayant toujours le même aspect si l'accommodation est constante.

Quand on regarde une ligne droite fine dans les mêmes conditions, on la voit prendre l'aspect d'une ligne multiple.

On observe ce phénomène en traçant un point et un trait sur une feuille de papier qu'on approche de l'oeil de manière à ne pouvoir accommoder dessus. En tournant la feuille on voit l'aspect de la ligne changer.

Ce phénomène s'explique par la structure du cristallin. Il présente outre sa structure en pelure d'oignon, des secteurs radiés qui ne sont pas tous exactement centrés : 6 facettes.

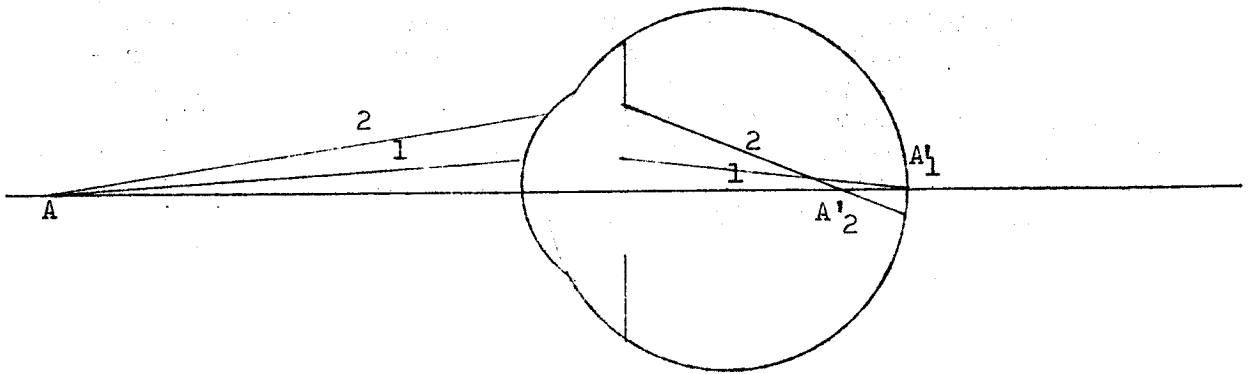
Quand l'image est au point, ce sont les muscles qui agissant sur le cristallin font coïncider les images. Au repos, l'oeil n'étant pas au point, on voit une série de taches correspondant aux secteurs.

Si on accommode sur un point lumineux très brillant, on a d'autres phénomènes assez compliqués dus à la diffraction par la texture fibreuse du cristallin et de la cornée. Ce sont des lignes étoilées à rayons $\pm$ longs on les observe en regardant un bec de gaz le soir. Ces phénomènes n'apparaissent pas en faible lumière.

Si l'oeil était parfait les rayons issus d'un point lumineux viendraient après réfraction à travers cornée et cristallin converger en un point de la rétine. Il n'en est rien à cause des aberrations et de la diffraction que nous avons vues.

Quand l'oeil regarde à l'infini, le signe de son aberration sphérique est tel que les rayons marginaux convergent plus près du cristallin que les rayons centraux.

La symétrie hexagonale d'un point lumineux vient des 6 facettes du cristallin.



Aberration sphérique de l'oeil

De là vient cette coutume très ancienne qui représente une étoile par un polygone à 5 ou 6 pointes.

Ces irrégularités varient suivant l'âge.

- Astigmatisme de l'oeil

L'oeil est généralement astigmat, c'est-à-dire qu'il n'est pas de révolution. Comme première approximation, il admet deux plans de symétrie (en général l'un vertical, l'autre horizontal) se coupant suivant une droite qui est axe binair et qu'on peut appeler axe optique de l'oeil.

Un point A placé sur l'axe de l'oeil n'a plus un point pour image : le système n'est plus stigmatique. Les rayons issus de A s'appuient dans le dernier milieu sur deux droites rectangulaires qui sont dans les plans de symétrie. Ce sont les droites caustiques.

Si au lieu du point A, on prend pour objet un système de droites concourantes et aussi identiques que possible, avec une accommodation convenable, on voit nettement une de ces droites ; avec une autre accommodation, on voit la droite normale à la première ; cette expérience fixe les azimuts des

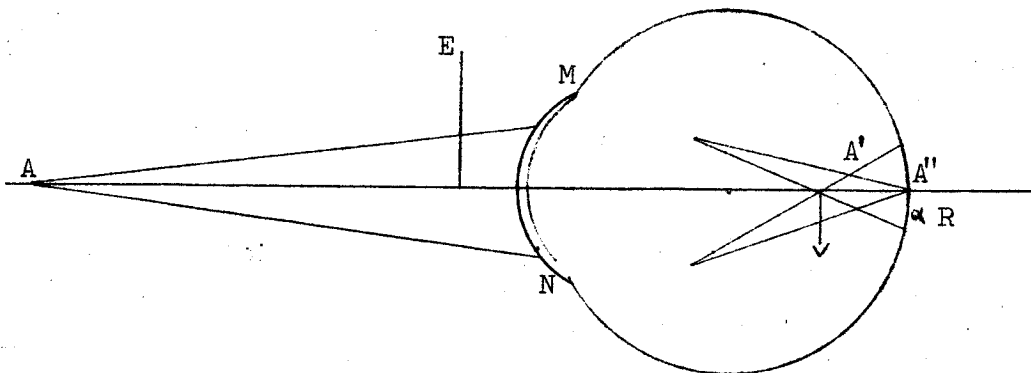
plans de symétrie de l'oeil. Les droites non situées dans ces plans restent floues quelle que soit l'accommodation. Les droites rectangulaires, dont nous pouvons annexer les images nettes sur la rétine, sont généralement l'une verticale, l'autre horizontale. La grandeur de l'astigmatisme (mesurée par la distance des droites caustiques) dépend des yeux ; il est rare qu'il soit nul. Nous voyons simultanément nettes deux droites rectangulaires pourvu qu'elles soient à des distances différentes de l'oeil. HELMHOLTZ voyait simultanément nettes deux aiguilles l'une verticale placée à 60 cm l'autre horizontale à 54 cm.

Causes de l'astigmatisme de l'oeil

L'astigmatisme de l'oeil est principalement dû aux courbes inégales de la cornée. Cependant, dans beaucoup de cas, il semble que l'astigmatisme cornéen soit neutralisé par l'astigmatisme d'accommodation du cristallin.

Aberration chromatique

L'oeil a forcément du chromatisme étant composé d'éléments tous convergents. Les rayons bleus convergent plus près du cristallin que les rouges, d'où l'accommodation nécessaire pour voir ensemble une surface (ou un point) bleue et une rouge, d'où sensation de relief en peinture, où l'on fait les ombres en complémentaires.



α cercle de diffusion de diamètre variable avec λ

L'oeil accommode sur un cercle moyen c et évite ainsi le chromatisme. Si on cache par un écran (E) la moitié de la pupille, on voit les bords d'un montant de fenêtre coloré de rouge d'un côté et de bleu de l'autre.

Si l'oeil accommode pour le rouge à l'infini il verra le bleu net pour la même accommodation à 70 cm.

Ceci permet de calculer la dispersion des foyers qui est égale à $4/10$ de mm. On peut ainsi calculer le diamètre du cercle de diffusion.

Théorie de POLACK

Elle a été édiflée par l'observation des oeuvres des grands peintres.

Il s'aperçut que parmi les peintres certains entourent les contours des montagnes par exemple de lisérés rouges et d'autres bleus.

D'après lui, les premiers sont hypermétropes
les seconds myopes.

RUBENS - DELACROIX : myopes
CARPACCIO : hypermétrope.

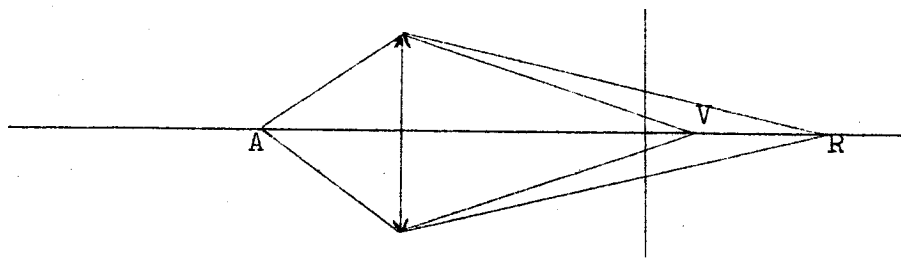
Un myope voit plus facilement les objets rouges, il a l'oeil trop long pour sa puissance. L'oeil normal voit un liséré bleu, il accommode sur le rouge et néglige le bleu.

L'oeil néglige ce qu'il ne peut expliquer d'une manière simple, c'est une règle générale, c'est le phénomène de neutralisation. Les lisérés qu'on ne perçoit pas normalement sont fondamentaux pour nous donner un élément monoculaire relatif à la distance des objets.

En effet, si nous accommodons pour le rouge à l'infini les plages claires sont bordées de lisérés bleus. Pour les plans plus rapprochés nous sommes accommodés par des couleurs plus réfrangibles et les lisérés changent. C'est là un élément

d'appréciation du relief qui nous manque quand nous regardons une photo couleur obtenue avec un objectif parfaitement achromatique. POLACK avait obtenu des résultats remarquables avec un objectif ayant un chromatisme convenable afin que l'image présente les liserés colorés que l'œil verrait normalement dans la nature.

Expérience : On utilise un verre coloré par le cobalt qui laisse passer le violet et le rouge. Un point lumineux A situé en deça du punctum proximum donne un cercle de diffusion bordé de rouge ;



situé au delà du punctum remotum, il donne un cercle de diffusion bordé de violet



Cette expérience montre que le proximum et le remotum sont définis pour la partie la plus brillante du spectre (jaune moyen $\lambda = 0,550$ micron). L'aberration chromatique de l'œil est supérieure à une dioptrie.

Les objets ne nous paraissent pas colorés parce que nous accommodons de manière à mettre sur la rétine l'image qui correspond au milieu du spectre ; le rouge et le violet donnent des cercles de diffusion qui se superposent et fournissent une

teinte pourpre peu lumineuse.

Images rétinienne

Image d'un point - L'image d'un point éloignée émettant de la lumière blanche ne se forme pas dans un seul plan (aberrations chromatiques). L'oeil est au point pour la radiation de longueur d'onde $580 \text{ m}\mu$. A cause de la diffraction, l'image n'est pas ponctuelle mais une tache lumineuse dans laquelle les éclairissements se répartissent suivant un solide de révolution dont la projection est appelée "disque d'airy".

Pour les autres radiations, la diffraction se combine avec un défaut de mise au point dû au chromatisme.

On peut admettre que toutes ces radiations ajoutent leurs effets en un point donné de la rétine. La source ponctuelle blanche produit une répartition de l'éclairement suivant la courbe ci-dessous :

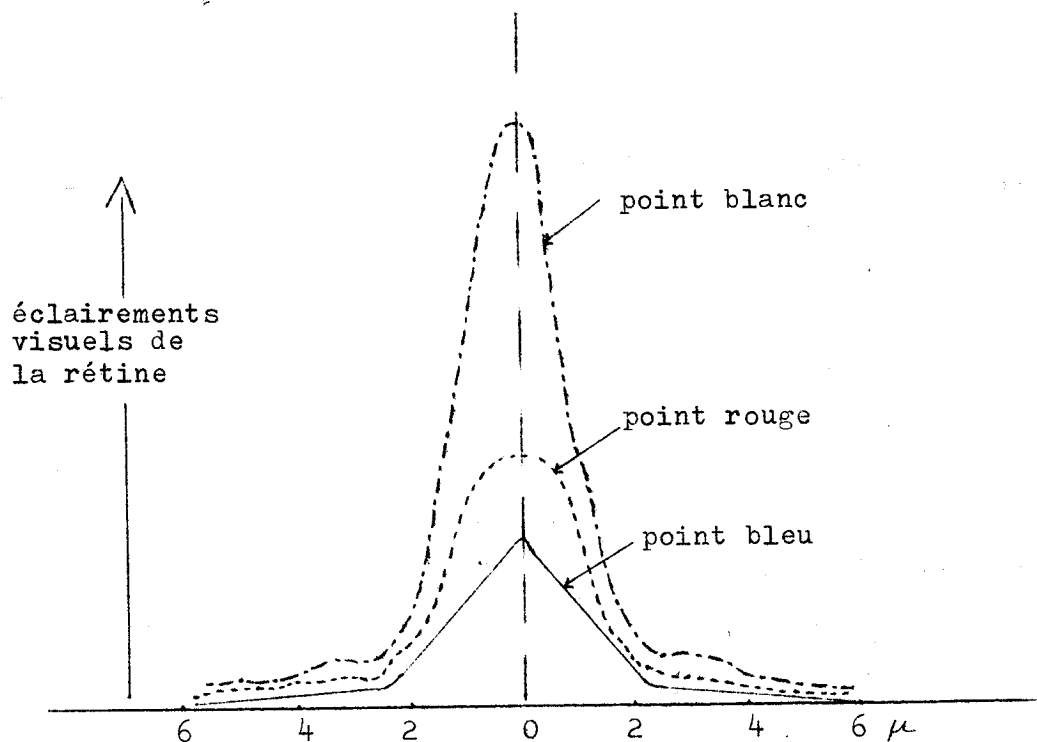
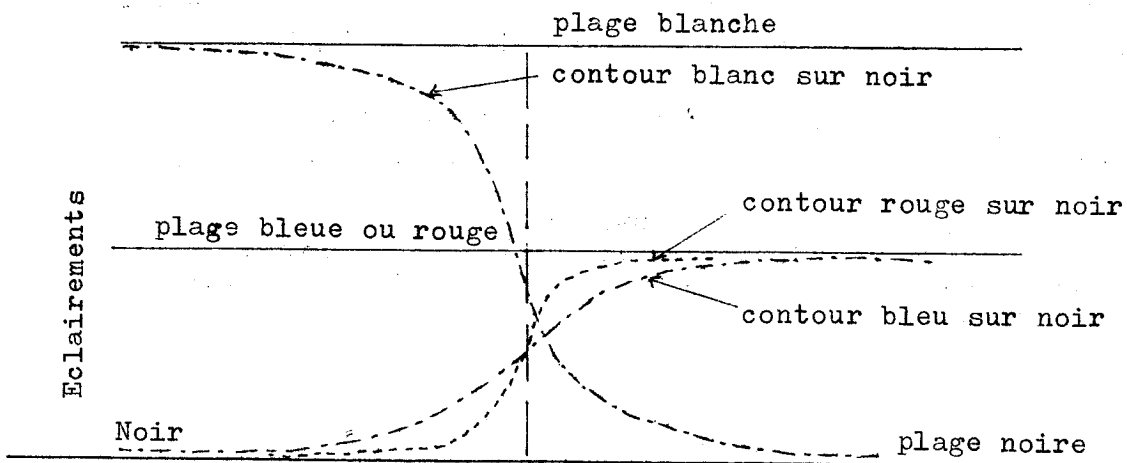


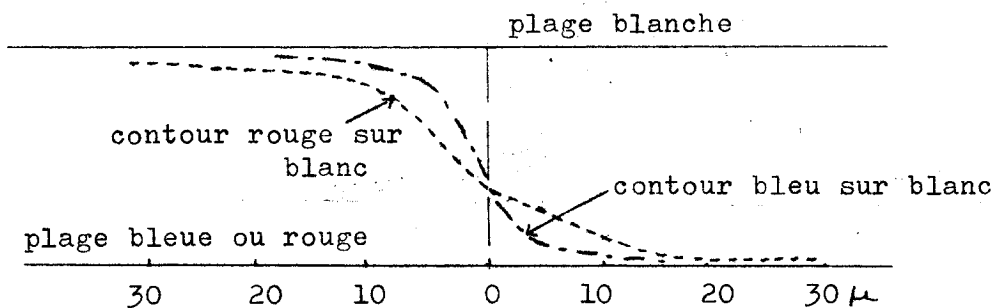
Image d'un contour séparant deux plages

La perturbation dans l'éclairement rétinien au bord d'une plage s'étale souvent jusqu'à 30μ de part et d'autre de l'image géométrique du contour.



Cette figure montre que le contour entre bleu et noir est plus doux à l'oeil, il est plus étalé qu'entre rouge et noir. Il y aura donc assombrissement d'une bande bleue sur fond noir.

Sur fond blanc les effets sont inversés. Sur un fond blanc c'est le bleu qui a un contour abrupt et le rouge a un contour étalé. L'aspect sera doux pour le rouge et dur pour le bleu sur blanc. Donc on aura un éclaircissement d'une bande rouge sur fond blanc.



Accommodation

C'est l'opération par laquelle les images d'objets situées à des distances différentes peuvent successivement se former nettes sur la rétine.

L'accommodation se fait par déformation du cristallin, le sommet antérieur avance et ses faces deviennent plus courbes ce changement de courbure porte principalement sur la face antérieure.

Le cristallin augmente donc d'épaisseur, pour la vision d'objets rapprochés, le diamètre de son cercle équatorial diminue. L'état de repos de l'oeil correspond à la vision éloignée. Certains alcaloïdes narcotiques comme l'atropine qui paralysent l'action des muscles, laissent l'oeil adapté sur le punctum remotum.

<u>Cristalloïde</u>	<u>antérieur</u>	<u>postérieur</u>
courbure au repos	10 mm	6 mm
accommodation	6 mm	5 mm

Il est assez difficile d'affirmer que la face postérieure se déforme alors qu'il est aisé de le vérifier pour la face antérieure.

Amplitude de l'accommodation :

Quand le cristallin est le plus plat, l'oeil est accommodé pour le point le plus éloigné qu'il puisse voir nettement le punctum remotum.

Les oculistes provoquent cet état en instillant dans l'oeil une solution de sulfate neutre d'atropine à 0,5 % ; quand l'oeil accommode au maximum, le cristallin est le moins déformé possible (c'est-à-dire le plus bombé); l'oeil voit nettement l'autre extrémité de son champ de vision, le punctum proximum.

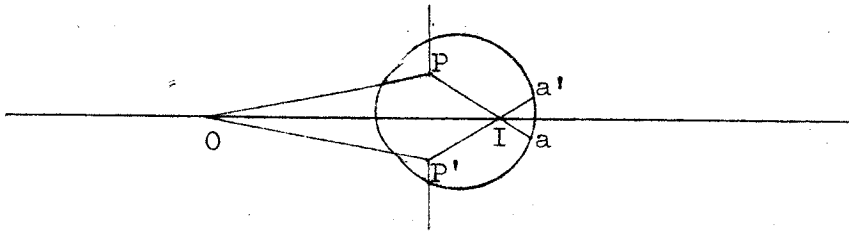
Ces deux points déterminent le parcours d'accommodation de l'oeil. Les deux yeux accommodent en général de la même quantité, ils regardent en général le même objet.

Précision de l'accommodation

On sait que l'objectif photographique permet de photographier des objets d'une certaine profondeur. Cette profondeur est d'autant plus grande que le diaphragme employé est petit. Pour l'oeil l'iris limite la précision avec laquelle l'accommodation doit se faire.

Soit un oeil dont la pupille est PP' et O un point lumineux dont l'image se trouve en I en avant de la rétine.

Il se forme sur la rétine non pas un point lumineux bien net mais un cercle aa' appelé cercle de diffusion.



On comprend qu'il doit y avoir une limite du diamètre de celui-ci au-dessous de laquelle il cesse d'être gênant.

Si on applique la formule qui relie l'image et l'objet dans un dioptré, on trouve que, à 1 mètre deux objets situés à 12 ou 15 millimètres l'un de l'autre sont vus aussi bien, avec une pupille de 4 mm de diamètre, ce qui a lieu pour un bon éclairage. L'accommodation ne varie plus entre 15 mètres et l'infini.

La distance maximum de vision distincte est définie par la distance D (Punctum Remotum).

Le point le plus rapproché qui peut être distingué grâce à l'accommodation est le punctum proximum, et sa distance d à l'oeil la distance minimum de vision distincte.

Si D et d sont exprimés en mètres, leurs inverses sont en dioptries.

$\frac{1}{d} - \frac{1}{D}$ est l'amplitude dioptrique d'accommodation.

Pour l'oeil normal :

$$\begin{cases} D = \infty \\ d = 25 \text{ cm} \end{cases}$$

On a donc $\frac{1}{0,25} - \frac{1}{\infty} = 4$ dioptries.

La précision de l'accommodation n'a jamais besoin d'être tout à fait parfaite pour avoir le maximum de netteté des images.

Il est même recommandé de ne pas mettre en jeu l'accommodation avec une exactitude trop grande. Pour la lecture, il faut apprendre à garder une accommodation moyenne pour le milieu des lignes et se contenter des images plus ou moins nettes pour les extrémités.

Quand il s'agit de voir des détails aussi fins que possible, il faut rapprocher l'objet jusqu'au punctum proximum, donc accommoder.

Pour voir des détails très fins, il est préférable d'employer la loupe qui doit être tenue à une distance de l'oeil égale à sa distance focale et qui permet de voir avec une désaccommodation complète. Ceci est général pour tous les instruments à oculaire, l'oculaire n'étant qu'une loupe servant à regarder une image réelle donnée par l'objectif. L'oeil prend facilement l'habitude d'accommoder au maximum quand il regarde dans un oculaire cela peut amener à des désordres graves de la vue et en particulier à la presbytie précoce. Il faut prendre soin de s'éloigner suffisamment de l'oculaire et de s'habituer

à désaccommoder le plus possible en regardant dans l'instrument, ce qui impose quelques exercices de vision correcte.

Pour cela, on place l'oeil à quelques centimètres en arrière de l'oculaire de manière à voir le centre de l'image (pupille de sortie) et par une faible rotation de l'oeil de voir des objets éloignés. L'oeil doit voir les deux images sans éprouver de sensation d'effort quand il passe d'une fixation à l'autre.

A la camera, il faut s'habituer à regarder les deux yeux ouverts, l'un regardant les objets à l'infini obligera l'autre à viser sans accommoder.

Quand on accommode, le diamètre de la pupille diminue ; il peut diminuer de moitié pour l'accommodation maximum, à ce moment le cristallin descend d'environ 0,3 mm, la choroïde est tirée en avant. Les parties périphériques de l'iris reculent légèrement.

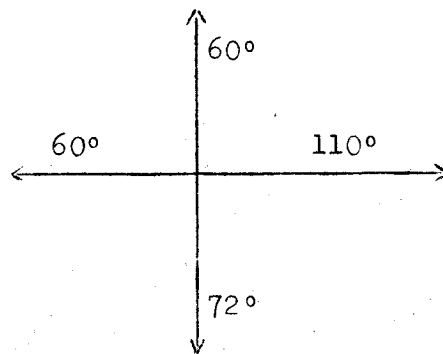
L'accommodation n'est pas instantanée ; elle peut durer de 0,1 à 0,4 seconde.

Nous verrons comment l'accommodation peut donner la sensation de relief à un borgne.

Oeil droit :

en haut 60°
en bas 72°
côté nasal 60°
temporal 110°

Champ visuel

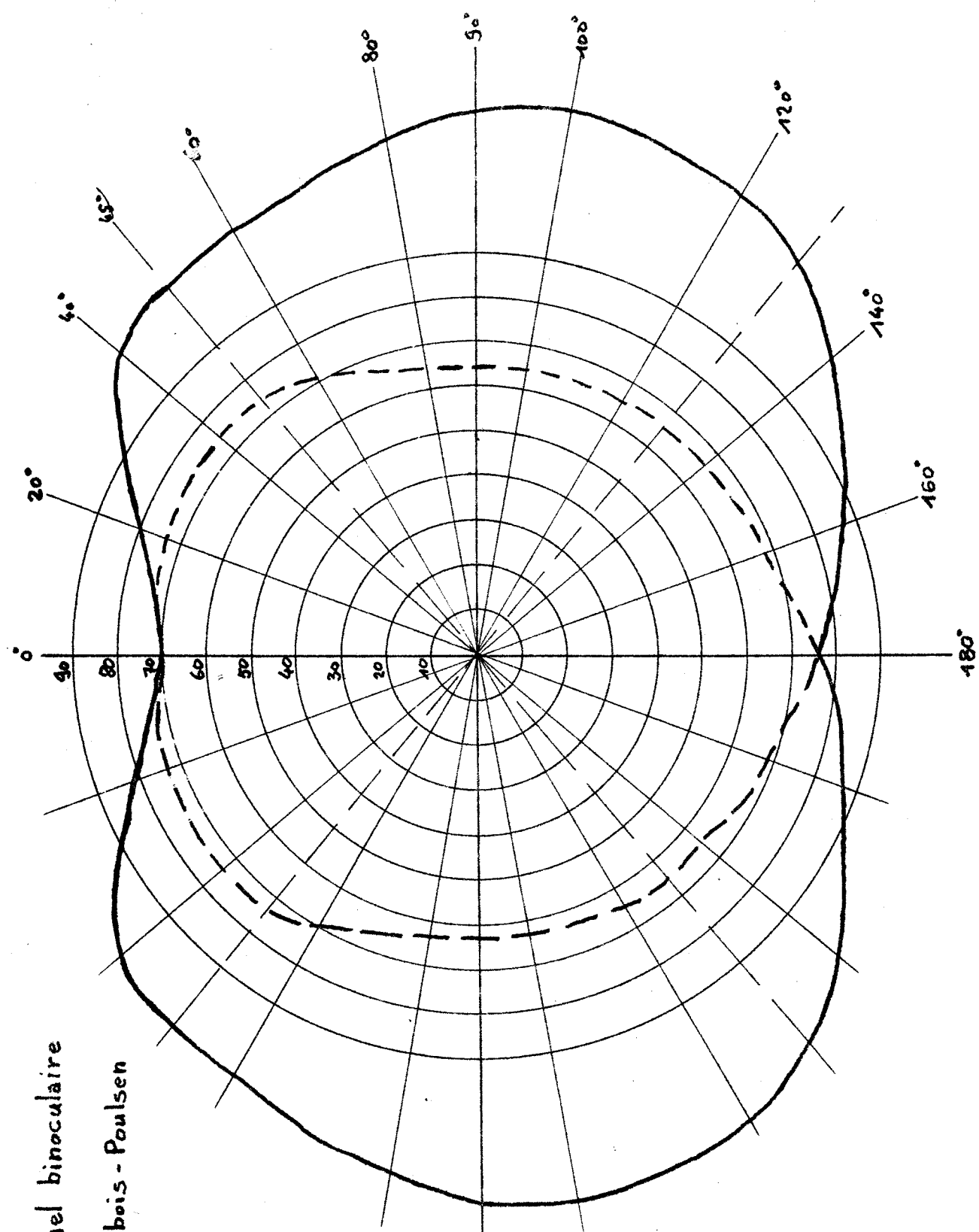


Dans ce champ visuel qui est énorme, nous ne voyons nettement que dans un angle de 2 à 3°.

(voir schéma p. 41)

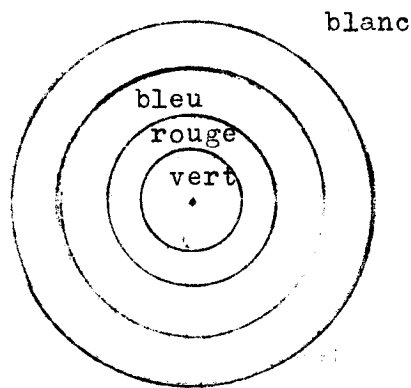
La sensibilité de notre champ visuel n'est pas uniforme, le seuil perceptible varie avec la couleur ; le fond de la fovéa

champ visuel binoculaire
après Dubois-Poulsen



n'est à peu près sensible qu'au noir et blanc, il est plus sensible aux détails.

Voici figurés les champs de sensibilité en fonction de la couleur.



Sensibilité de la rétine

Un observateur n'est pas capable d'établir avec une précision suffisante une gradation dans la visibilité des objets mais par contre il apprécie d'une manière relativement exacte et reproductible l'aspect particulier que présente un objet, ou un détail d'un objet, lorsqu'il est tout juste perceptible. C'est pourquoi l'évaluation des facultés de perception de l'oeil fait appel dans l'état actuel de nos connaissances à des mesures de seuils.

On définit subjectivement la vision par l'acuité, seuil de visibilité des détails et par le seuil de contraste relatif à la plus petite différence de luminance perceptible. Il est souvent utile de considérer en outre le seuil de luminance (plus petite luminance perçue) et plus rarement le seuil ponctuel (visibilité limite de points lumineux).

L'acuité et le seuil de contraste dépendent de facteurs nombreux mais le plus important d'entre eux est la luminance de l'objet. Le domaine des luminances accessibles à l'oeil est immense et s'étend de quelques stilbs à 3×10^{11} stilb.

La limite inférieure correspondant à la vision diurne peut être fixée assez arbitrairement à 10^{-4} stilb. Dans la vision de nuit sont classées les luminances comprises entre 10^{-4} stilb et le seuil absolu, l'intervalle entre 10^{-4} et 5.10^{-7} sb caractérisant la vision crépusculaire, celui compris entre 5.10^{-7} sb et le seuil absolu de luminance la vision nocturne proprement dite.

La vision diurne est caractérisée essentiellement par un maximum très aigu d'acuité dans la fovéa entraînant le réflexe de la fixation de l'objet qu'on veut examiner et la stabilité relative de l'acuité et du seuil de contraste en fonction de la luminance.

La vision crépusculaire se distingue de la vision diurne par une élévation progressive du seuil de contraste de plus en plus rapide à mesure que la luminance décroît. Il en résulte que l'acuité varie d'une manière très différente suivant la forme de l'objet.

Un peu avant que le seuil fovéal ne soit atteint, l'acuité fovéale devient plus petite que celle des parties voisines de la rétine et le sujet cesse de fixer, s'il est entraîné à la vision de nuit, pour utiliser la zone périfovéale. Dans le domaine de la vision nocturne la fovéa est aveugle. La sensibilité de la rétine croît rapidement dès qu'on s'en écarte, pour atteindre une valeur sensiblement constante dans un champ très étendu (de 7° à 35° à partir de la fovea).

Le seuil perceptible est très variable avec la couleur.

Le seuil de la sensation varie suivant les circonstances.

Le seuil d'apparition n'est pas le même que celui de disparition.

Pour le bleu, l'intervalle des seuils est 625 pour un oeil adapté à l'obscurité.

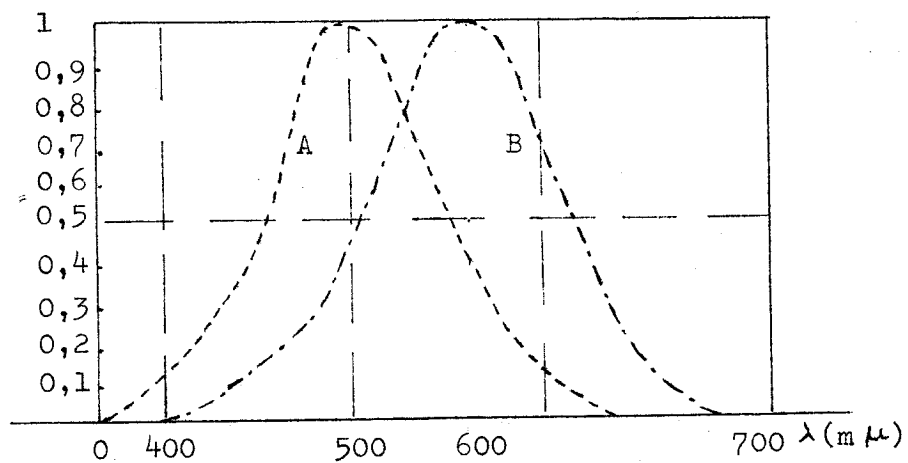
Pour voir une étoile délicate, il faut ne pas la regarder, il faut la voir sur la périphérie de la fovéa (Aragon).

Dans la nuit, il est difficile de decouvrir un point rouge, mais quand on l'a trouve on le voit facilement. Parce que la périphérie est peu sensible au rouge.

Au contraire, quand on fixe le bleu à la limite de visibilité, il disparaît si on le fixe alors que le rouge disparaît dès qu'on cesse de le fixer.

Courbe de visibilité

Sur 125 sujets normaux leurs courbes de visibilité se répartissent entre des limites assez écartées.



Courbe de visibilité

- A brillance très basse (bâtonnets)
- B brillance élevée (cônes)

Ordonnées relatives y de la courbe de luminosité en fonction de la longueur d'onde :

$\lambda(m\mu)$	y	$\lambda(m\mu)$	y
380	0,0000	575	0,9154
400	0,0004	600	0,6310
450	0,0380	625	0,3210
475	0,1126	650	0,1070
500	0,3230	675	0,0232
525	0,7932	700	0,0041
550	0,9950	725	0,0007
555	1,0002	750	0,0001
560	0,9950	770	0,0000

Le maximum varie de 549 à 570 $m\mu$

La moyenne se place à 557,6

L'écart quadratique moyen étant 4 $m\mu$

Limites du spectre :

$$\lambda = 430 m\mu \quad 0,014 < \text{Visibilité pour } \lambda < 0,064$$

$$\lambda = 700 m\mu \quad 0,0028 < V_{\lambda} < 0,0069$$

En 1924 la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.) a défini un "observateur de référence" pour la vision en adoptant une courbe de visibilité qui serait celle de cet observateur fictif. Cette courbe est la représentation de la visibilité pour un sujet de moins de 30 ans, le cristallin avec l'âge, absorbe davantage le violet, d'ailleurs même pour un sujet de moins de 30 ans le facteur spectral de transmission τ_{λ} du cristallin n'est constant que pour $\lambda > 450 m\mu$. Le diamètre du test est de 2°.

Fixation fovéale

Niveau intermédiaire entre les niveaux photopique et scotopique. Adaptation à ce niveau.

Pour éviter les mesures de courbe pour chaque individu on se contente de mesurer le rapport :

$$\frac{Y}{B} = \frac{\text{Jaune}}{\text{Bleu}}$$

Dans deux cuves de 1 cm d'épaisseur, on place 2 solutions de bichromate de potassium $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$ et de sulfate de cuivre SO_4Cu , $5\text{H}_2\text{O}$ aux concentrations respectives de 72 et 57 g par litre.

Ces cuves sont interposées entre les plages d'un photomètre à comparaison directe avec des lampes à incandescence fonctionnant à la température de couleur de 2080°K (filament de carbone). Un sujet plus sensible que la moyenne aux grandes longueurs d'onde verrait le jaune plus lumineux que le bleu, son rapport serait supérieur à 1, mais l'observateur moyen de la C.I.E. a un rapport égal à 0,99: On peut remarquer que deux points symétriques de la courbe par rapport au maximum ont le même coefficient de visibilité ; les plages paraissent identiques à l'oeil nu mais il a fallu multiplier par 32 l'énergie de la plage rouge quand l'oeil est adapté à l'obscurité et quand les niveaux sont faibles.

Effet Purkinjé

Aux faibles lumières, le maximum de la courbe de visibilité se déplace vers les courtes longueurs d'onde, de 557,6 mμ il passe à 5010.

Quand une source baisse progressivement d'intensité, c'est la couleur qui disparaît en premier, sauf pour les rouges.

Les bâtonnets voient les rouges plus sombres et les bleus plus clairs que les cônes.

Maximum de visibilité dans le bleu :

5100 Å (bâtonnets)

dans le jaune-vert 5600 Å (cônes)

La nuit l'oeil est surtout sensible aux radiations bleues, ce qui est en accord avec la composition de la lumière nocturne qui est due à la diffusion des courtes longueurs d'onde dans l'atmosphère.

Donc la nuit l'oeil accommode sur les radiations bleues, il en résulte une myopie de l'ordre de 1 dioptrie. Les oculaires des instruments utilisés la nuit sont d'ailleurs marqués -1 dioptrie en vue de cette correction.

Les brillances des écrans de projection cinématographique placent souvent l'observateur dans le cas de la vision scotopique faisant intervenir le phénomène de Purkinjé, ce qui a pour effet de diminuer le rendu des rouges par rapport aux bleus.

Action de l'U.V.

Une exposition prolongée de l'oeil à l'ultra-violet (3100 Å et en dessous) provoque une inflammation, les ophtalmies neigeuses proviennent de l'ultra-violet, intense aux grandes altitudes. Sous l'action de l'U.V. le cristallin devient fluorescent cette lumière bleuâtre est très visible sur un sujet dont on éclaire l'oeil avec une lampe de Wood qui ne laisse passer que l'U.V. Cette fluorescence du cristallin ne produit sur la rétine qu'un voile lumineux, la rétine étant elle-même un peu fluorescente, nous voyons un gris lavande.

Un observateur ayant subi l'ablation du cristallin à la suite d'un accident a étudié les impressions reçues par l'oeil devenu ainsi sensible à l'U.V. jusqu'à 3.100 Å - elles sont violettes de 4200 à 3600 puis bleues au delà. Il précise qu'il ne s'agit nullement d'une fluorescence de la rétine. La sensation violette du proche U.V. serait due à un maximum secondaire de la sensation de rouge vers 4.000 Å. Aux faibles intensités U.V. les sensations sont en tous points semblables à celles d'un oeil normal observant de la lumière visible.

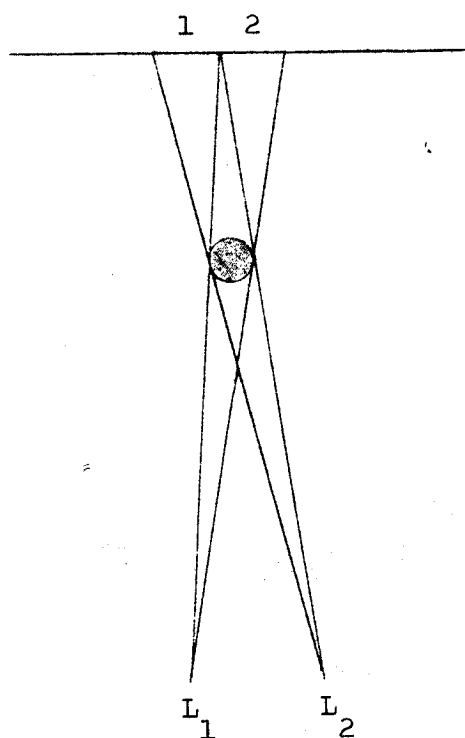
La rétine est sensible à une grande variété de rayonnements : rayons X et même γ .

L'infrarouge n'est pas sans danger pour l'oeil ; pratiquement il est totalement arrêté par la cornée. Cependant l'échauffement de l'oeil par absorption des I.R. provoque du larmoiement, des maux de tête et même des opacifications de la cornée et surtout du cristallin.

Sensation différentielle

L'oeil est capable d'apprécier des écarts de lumière de l'ordre de 10^{-12} en intensité et en fréquence de 0,4 à 0,5 micron.

Experience :



1	2
I	$I + \Delta I$

Soit I l'intensité en 1
 $I + \Delta I$ l'intensité en 2

Le sujet regarde deux plages lumineuses uniformes et contiguës possédant les luminances I et $I + \Delta I$. Le problème consiste à déterminer la valeur de ΔI pour laquelle le sujet perçoit la différence.

Pour toute valeur inférieure à ΔI les deux plages sont confondues.

Cas particulier : $I = 0$ la plus petite luminance visible sur un fond obscur, c'est le seuil absolu.

L'oeil n'est qu'un appareil détecteur, il ne peut être un appareil de zéro. Pour mesurer un seuil absolu, il est nécessaire de laisser le sujet une heure dans une ambiance faible puis une heure encore dans l'obscurité totale, l'oeil étant adapté à l'obscurité, le seuil s'abaisse considérablement.

De nombreux facteurs peuvent faire varier les valeurs du seuil : ambiance de la mesure du seuil si la mesure se fait sur une petite plage ; mesure du seuil de l'ambiance ; présence dans le champ visuel d'une source de lumière de trop forte brillance ; distinction de couleurs très foncées dans une ambiance claire ; dimensions des plages à comparer et couleur de la lumière.

La notion de seuil différentiel a une importance beaucoup plus grande que celle du seuil absolu ce dernier ne sert qu'à se diriger la nuit, tandis que c'est le seuil différentiel qui règle la perception des objets se détachant sur un fond.

Le seuil différentiel est l'élément de base qui permet de juger une photographie par son modelé, c'est par lui seul que nous voyons le relief d'une sphère éclairée de côté.

Influence de l'adaptation et du contraste sur la brillance apparente

La sensibilité de l'oeil variant considérablement avec son état d'adaptation, l'étude du problème de la reproduction des brillances implique la connaissance de la variation de la sensibilité de l'oeil en fonction de l'adaptation. En général, le niveau d'adaptation de l'oeil est beaucoup plus bas pour l'examen de l'épreuve que pour l'examen du sujet.

La brillance apparente ne dépend pas seulement du niveau d'adaptation mais encore de la répartition des autres brillances dans la scène considérée.

La brillance en un point du champ dépend de la brillan-

ce des plages adjacentes.

Loi de Fechner

FECHNER définit une grandeur S telle que pour tout passage d'un échelon au voisin, cette grandeur varie d'une quantité ΔS constante.

D'après la loi établie par BROCA, chaque échelon relatif $\frac{\Delta I}{I}$ serait constant par définition.

ΔS l'est aussi - on peut poser :

$$\Delta S = K \frac{\Delta I}{I}$$

On remplace les variations finies par des différentielles et on intègre

$$S = K \log_e I + Cte$$

On fixe la valeur de la constante en convenant que $S = 0$ au seuil absolu d'où :

$$S = K \log \frac{I}{I_s}$$

FECHNER appela S la sensation, d'où la loi de Fechner.

La sensation est proportionnelle au logarithme de l'excitation.

On peut se demander pourquoi cette loi de variation, cela tient à la fatigue de l'oeil, celui-ci se défend contre les destructions des tissus par la lumière intense en diminuant l'action.

Si, sur une plage colorée, on projette une lumière colorée, on a disparition des couleurs différentes de celle de la lumière colorante. On peut se servir de ce fait pour perfectionner la vision des pigments et des éruptions (M.A. BROCA).

Les pigments diffusent la couleur dont ils portent le nom avec la même intensité que le papier blanc.

L'élément de différenciation se trouve donc dans les couleurs dont ils ne portent pas le nom et la teinte dont ils portent le nom fatiguera inutilement. C'est le cas par exemple d'une éruption sur la peau. Ces petites taches se différencient par absorption dans le bleu, et sont noyées dans la lumière rouge. Si nous l'éclairons par de la lumière verte, la différenciation se fera par suppression de la teinte parasite rouge.

Phénomènes de fatigue

Quand l'oeil est frappé par une lumière intense

- 1°- la pupille se contracte,
- 2°- le pigment de la couche des cellules hexagonales se glisse entre les cônes et bâtonnets et les diminue en les étranglant. Il protège les éléments sensibles en transformant une partie de l'énergie reçue en chaleur.

Nous avons vu que le pourpre rétinien est transformé par la lumière ; cette vision modifie à chaque instant les conditions de vision.

Images accidentelles ou subjectives

Quand l'oeil après avoir contemplé une surface très éclairée se reporte sur une surface claire, nous voyons l'image de la première surface en sombre. A très basse lumière si nous regardons une source faible, l'image accidentelle apparaît tout de suite.

Si au contraire, on impressionne vivement l'oeil l'image n'apparaît qu'après une période d'obscurité qui peut atteindre 5 à 6 secondes et durer quelques minutes.

La luminosité décroît tandis que leur couleur est alternativement analogue à celle des stimuli disparus et grossièrement complémentaire.

Un observateur placé dans une cabine sombre d'un bateau regarde à travers le hublot le ciel très lumineux pendant quelques minutes sans promener le regard. Il lui suffira de fermer les yeux pour voir apparaître le disque en images consécutives (Bleu, vert, jaune, rouge, pourpre, bleu, vert, etc...). Ces phénomènes jouent un rôle important dans la vision des films en couleurs.

Lumières brèves

La rétine ne se repose pas instantanément après cessation de l'excitation.

Des excitations successives suffisamment rapprochées ne se discernent pas les unes des autres. La persistance rétinienne est fonction de la quantité de lumière.

Avec une lumière de très courte durée, on peut obtenir une impression définie.

Expérience : on éclaire à l'aide d'une étincelle électrique puissante une affiche en couleur. La durée de l'éclairement est inférieure à 10^{-5} ou 10^{-6} seconde ; un grand nombre de détails du dessin peut être perçu correctement.

Lumières très brèves

Quand l'excitation est faible, les quantités excitant la rétine sont de la forme linéaire. Ceci intervient dans le cas des signaux lumineux. Quand on regarde un projecteur à moins de 15 ou 20 km de distance, s'il est très puissant on suit mal la manipulation, il faut diminuer l'éclat à cause des images persistantes.

A très basse lumière, il faut allonger les longues :
1 longue = 3 brèves. à la limite de la perception :
1 longue = 5 brèves.

Un éclair lumineux qui ne dure qu'un temps très court a le même effet visuel qu'un éclair de durée deux fois moindre

et d'intensité deux fois plus grande seulement dans le cas de temps très courts de l'ordre de quelques centièmes de seconde.

Persistance des lumières brèves

Un éclair lumineux semble toujours posséder une durée appréciable tant que sa durée ne dépasse pas 15/100 de sec. Le sujet éprouve la même sensation que pour un éclair instantané.

L'oeil a une très faible capacité de sommation dans le temps : une lumière très faible qui n'est pas vue après 2 ou 3 secondes ne sera jamais vue.

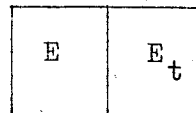
Etant donné la vitesse relativement lente de propagation de l'influx le long des nerfs (environ 20 m/s.) un éclair très bref sera perçu avec un retard de l'ordre de 2/10 de seconde. De même qu'il existe un retard à l'apparition, il existe un retard à la disparition qui est en général plus long si bien qu'au total il se manifeste une persistance.

Au cinéma, le papillotement disparaît, on dit qu'il y a fusion. La sensation est la même que si la lumière restait à une valeur constante qui est la moyenne mathématique de toutes les valeurs prises par la lumière variable.

Variation de l'impression lumineuse dans le cas de lumières variables

Supposons deux écrans juxtaposés l'un d'eux E est éclairé d'une façon constante, l'autre est d'abord éteint puis éclairé brusquement.

On règle E_t de manière que les deux éclairissements paraissent identiques au moment où l'on rétablit la lumière E_t

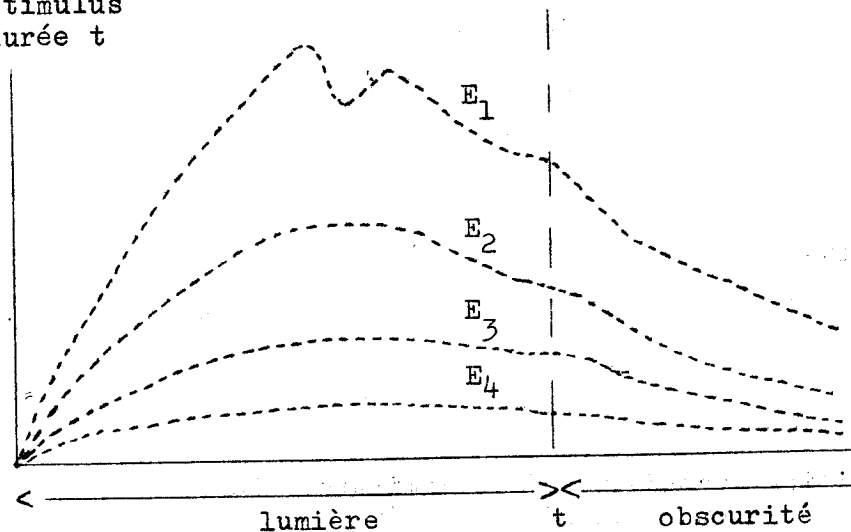


Les résultats varient suivant la valeur de E.

1°- Si E est faible, les impressions se présentent par la courbe E_4 . L'oeil met un certain temps pour percevoir la lumière.

La sensation augmente progressivement, puis reste constante et disparaît à l'extinction.

luminosité
du stimulus
de durée t



2°- Si l'éclairement est fort, on obtient une courbe E_3 ; la partie légèrement décroissante de la courbe dans la lumière correspond à une fatigue de l'oeil.

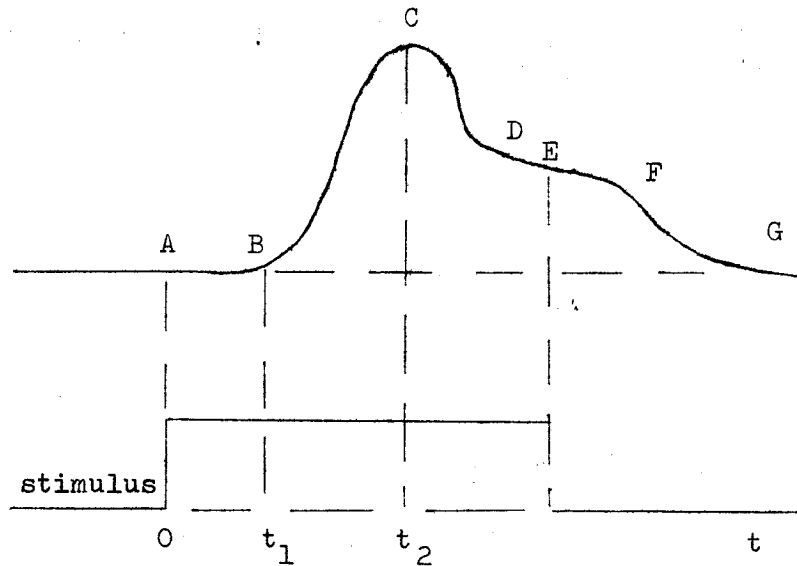
3°- Si l'éclairement augmente, on a la courbe E_2 avec une fatigue plus accentuée.

4°- Enfin pour des éclaircissements très intenses E_1 certains voient deux ou plusieurs maxima.

Lumière durable

Soit un stimulus de niveau constant dont la durée atteint

au moins quelques secondes ; la sensation lumineuse varie en fonction du temps.



L'apparition secondaire d'une luminance élevée E alors que l'oeil est adapté à un niveau général E_0 plus faible produit une impression désagréable de choc (en partie à cause du travail de l'iris). Le choc est plus marqué pour de petites sources de forte luminance.

Scintillement et papillotement

Le scintillement est un trouble de la vision dû aux variations importantes et rapides de l'éclairement, produites par une lumière périodiquement variable. C'est un phénomène d'ordre photométrique. Il peut se produire au cinéma du fait que la lumière est masquée pendant le changement d'image.

A 24 images avec un bon obturateur on supprime pratiquement le scintillement.

La fréquence de 24 images par seconde a été adoptée

lors des premiers films parlants aux Etats-Unis. Le scintillement dépend d'un très grand nombre de facteurs : fréquence et répartition des extinctions, brillance de l'image, couleur de l'image, position de l'image sur la rétine etc...

La papillotement est un trouble de la vision dû au mouvement des objets éclairés d'une manière discontinue. L'oeil ne peut se fixer sur aucune position de l'objet c'est un phénomène d'ordre géométrique.

Il faudrait augmenter le nombre d'images intermédiaires entre deux positions de l'objet. On ne perçoit le papillotement que par des vues comportant des objets très contrastés animés d'un mouvement rapide. C'est un phénomène fréquent dans un panoramique sur un décor ayant des verticales. Il est possible de remédier à ce défaut en dessin animé, si l'on veut représenter un trait se déplaçant rapidement, en élargissant le trait par des barbules comme on en voit sur une photographie bougée.

C'est l'imagination guidée par la logique qui nous permet d'interpréter les images cinématographiques, nous comblons les positions intermédiaires qui n'ont pas été perçues et pour cause. La sensation de continuité des mouvements en cinématographie résulte avant tout d'un processus psychologique.

Phénomènes optiques

Irradiation :

Supposons un écran blanc sur un fond noir : si on l'éclaire violemment, il paraît augmenter de dimensions. Sur la rétine, il y a une ligne de séparation entre le blanc et le noir, les éléments très lumineux projettent de la lumière sur les voisins. Le phénomène est semblable au halo photographique autour d'une plage surexposée.

Yves Le GRAND a montré que la diffusion n'est pas la seule cause ; ce serait une excellente preuve de l'interconnexion entre les cellules réceptrices de la rétine.

L'illusion du ruisseau qui remonte sa pente est un phé-

nomène différent de l'illusion de mouvement que l'on appelle mouvement consécutif. Si on regarde longtemps une chute d'eau ou bien un train qui passe sous un pont sur lequel on se trouve, on a l'impression de voir ensuite les objets immobiles se mouvoir en sens inverse.

Mirages supérieur et inférieur.

Variation du diamètre apparent du soleil à son coucher.

Les illusions géométriques peuvent s'appliquer aisément lors de la construction d'un décor en studio, et peuvent être amplifiées par des phénomènes d'ordre chromatique que nous étudierons dans la vision des couleurs.

VISION DE LA COULEUR

-:-

Jusque là nous avons eu affaire à un simple problème optique en étudiant la formation de l'image sur la rétine.

Les différents organes situés dans la rétine même ont pour tâche de transformer la lumière incidente en une autre forme d'énergie propre à transmettre les impressions au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique.

La première phase de cette transformation est de nature photochimique. Les cônes et les bâtonnets contiennent des matières qui subissent des transformations chimiques sous l'influence de la lumière. Les transformations photochimiques s'accompagnent d'une libération d'énergie sous forme électrique. Ce sont des ruptures d'équilibre électrique qui sont transmises par le nerf optique à la partie de l'écorce cervicale destinée à la perception des impressions visuelles. Pour étudier le phénomène de la vision des couleurs, revenons à la constitution de la rétine.

Nous avons vu que la rétine présente deux sortes d'éléments photosensibles ; les cônes et les bâtonnets caractérisés par des propriétés très différentes. Les bâtonnets contiennent le pourpre rétinien qui est la substance photosensible. Les cônes au contraire ne contiennent pas de pourpre rétinien ou tellement peu qu'il a fallu identifier d'autres substances pour pouvoir expliquer la photosensibilité. Une autre différence importante est que les cônes seuls nous permettent de voir les couleurs alors que les bâtonnets ne nous montrent que des différences de densités comme une photo noir et blanc.

De nombreuses théories de la vision chromatique ont eu leur vogue, on s'est arrêté à la théorie trichromatique (YOUNG - HELMHOLTZ). La plupart des chercheurs se sont bornés à des études sur une théorie trichromatique.

Selon YOUNG, la rétine possède des éléments de trois espèces sensibles respectivement au bleu indigo, au vert jaune et au rouge ce qui lui permet de voir par synthèse la totalité des couleurs.

La sensation de couleur que nous éprouvons se présente le plus purement dans le cas de couleurs spectrales. La couleur des radiations simples est donc la traduction subjective de leur longueur d'onde.

Si nous regardons un spectre solaire, nous voyons trois groupes importants :

1) Violet-bleu 2) Vert avec un liséré jaune 3) Rouge.

Si nous voulons vraiment décomposer, les nuances sont au nombre de 200 dans un spectre.

Les couleurs que nous trouvons dans la nature ne sont jamais des couleurs spectrales, ce sont des mélanges de radiations simples et l'oeil est incapable de reconnaître les radiations simples qui constituent la lumière complexe.

La couleur n'est pas une quantité objective à mesurer et comparer de la même manière que longueur ou masse ; c'est une sensation de nature complexe variant avec : le niveau de l'éclairement, la surface de l'échantillon observé, le brillant de la surface, l'état d'adaptation de l'oeil, la lumière ambiante et l'illuminant principal, et enfin les contrastes.

Notre oeil s'adapte bien à une couleur monochromatique ; dans ce cas l'acuité visuelle se trouve favorisée.

A la lumière jaune de sodium, l'oeil a une acuité visuelle maximum mais ne supporte pas longtemps la fatigue provoquée par l'effort d'accommodation. C'est pourquoi l'éclairage en lumière jaune des routes n'a pas été définitivement adopté. Tout au moins d'une façon continue on a envisagé de manière à reposer l'oeil, d'alterner avec de la lumière blanche. La lumière qui fatigue le moins à éclairement égal est la lumière blanche.

Quand l'oeil regarde à l'écran une scène en couleur, l'oeil n'ayant pas le temps, comme dans la nature, de regarder successivement toutes les plages colorées éprouve une gêne et une fatigue en peu de temps. Supposons que nous ayons l'attention attirée par une plage rouge, nous la fixons quelques secondes, puis brusquement la scène change ; exactement à la place de la plage rouge, apparaît une plage verte, l'oeil doit changer d'accommodation. Ceci répété un grand nombre de fois provoque une fatigue insupportable de l'oeil.

Anomalies de la vision des couleurs

Si l'observateur a une vision normale il fait appel à trois couleurs fondamentales, il est trichromate. Les dichromates (appelés daltoniens n'ont que deux récepteurs, ils voient le spectre bicolore).

Les monochromates (ou achromates) ne perçoivent pas de sensation colorée, mais seulement des sensations plus ou moins lumineuses. Ce cas est assez rare.

Beaucoup de mammifères sont achromates même le taureau qui est soi-disant excité par le rouge. Les sujets qui ne perçoivent pas le rouge (dichromate , protanotropes) et ceux qui ne le perçoivent que faiblement (trichromates anormaux) sont incapables de travailler en lumière rouge, ce qui peut avoir des conséquences fâcheuses chez un photographe. Il serait souhaitable que dès l'entrée à l'école on procède au dépistage des anomalies chromatiques. Certains sujets au contraire ne différencient pas le vert (dichromates deuteranopes) et à plus forte raison ceux qui le perçoivent faiblement peuvent travailler en éclairage inactinique vert. La lumière verte ne provoque pas chez eux la sensation de couleur, mais une sensation de luminosité. Même chez un sujet à vision normale la vision des couleurs n'est pas constante, elle varie avec la lumière ambiante à laquelle on est adapté.

Le Professeur WRIGHT à Londres a étudié la variation de la vision colorée avec l'âge : le jaunissement du cristallin atténue les bleus et violets et les fonce. Le dichromatisme est héréditaire. Une femme ne peut être dichromate que si le défaut existe des deux côtés de son ascendance.

Un homme transmet ce défaut à ses petits-enfants par l'intermédiaire de ses filles qui peuvent ne pas l'être.

On rencontre de 2 à 3 % de dichromates chez les hommes et seulement moins d'un millième chez les femmes.

Couleurs pures

Ce sont celles qui correspondent aux diverses bandes spectrales monochromatiques, chacune est caractérisée par sa longueur d'onde.

Il ne convient donc pas d'utiliser l'adjectif "pur" pour un blanc, un gris ou un noir, qui devra se contenter d'être neutre.

Couleurs complémentaires

Deux lumières colorées qui, simultanément, produisent sur l'oeil la sensation de blanc sont dites complémentaires.

Lumière blanche

La sensation blanche joue un grand rôle dans tous les problèmes de la vision des couleurs du fait que la notion de blanc est fournie par l'illuminant naturel : le soleil, qui est un illuminant très variable au cours d'une même journée, avec les conditions atmosphériques du moment et tout au cours de l'année. D'autre part tous les différents illuminants artificiels fournissent après adaptation une sensation que nous appelons encore blanche, quoique ne s'en approchant que grossièrement.

Trois illuminants appelés respectivement "A", "B", et "C" ont alors été codifiés par la C.I.E.

1°- Illuminant "A" : C'est le rayonnement fourni par une lampe à filament de tungstène incandescent dans une atmosphère gazeuse, la température de couleur étant 2848°K.

Le rayonnement de cette lampe représente l'éclairage artificiel par incandescence.

2°- Illuminant "B" : Il est impossible d'élever la température de couleur d'un filament de tungstène au-dessus de 3500°K pour obtenir une température de couleur plus élevée ; il faut utiliser une lampe au tungstène en absorbant une partie des grandes longueurs d'onde.

3°- Illuminant "C" : De même que pour l'illuminant "B" il résulte de l'illuminant "A" dans lequel les grandes longueurs d'onde sont absorbées par deux filtres liquides.

Les filtres utilisés pour les illuminants "B" et "C" ont été établis par DAVIS et GIBSON du National Bureau of Standards.

Le rayonnement de l'illuminant "B" est élevé à la température de couleur de 4800°K ce qui correspond dans le spectre visible à la lumière provenant directement du soleil.

L'illuminant "C" correspond à une température de couleur de 6500°K qui est la moyenne des températures de couleur du ciel bleu.

Les rayonnements de "B" et "C" encadrent celui d'un spectre d'égale énergie ; "B" est un peu plus rouge et "C" un peu plus bleu .

voir schéma p. 65

Caractéristiques d'une couleur

Une source (primaire ou secondaire) de couleur peut être définie par trois caractéristiques :

- 1°- Longueur d'onde dominante
- 2°- Intensité de la radiation simple
- 3°- Pureté (ou saturation)

Psychologiquement l'oeil rattache à une couleur les attributs : teinte, pureté, intensité au fait que :

1°- la sensation colorée s'identifie à une sensation que l'éducation nous a donné l'habitude d'appeler rouge, verte, bleue , etc...

2°- cette teinte paraît plus ou moins lavée de blanc

3°- cette sensation est plus ou moins violente.

L'oeil ne chiffre pas plus les différences de qualité (teinte et pureté) que les différences d'intensité. L'usage de l'oeil comme moyen d'estimation d'une couleur ne permet donc qu'une mesure des plus grossières.

Nous voyons que trois variables sont nécessaires et suffisantes pour décrire le monde de la couleur.

Les procédés trichromes sont valables parce que notre rétine ne règle la vision des couleurs qu'avec trois variables. La sensation colorée dépend à la fois de la lumière qui la provoque et de l'observateur qui la perçoit ; on a été conduit à définir un oeil moyen de référence.

Les résultats obtenus ne s'interprètent simplement que si l'on respecte certaines conditions expérimentales.

1°- adaptation de la vue à la lumière du jour, donc brillance suffisante des plages observées

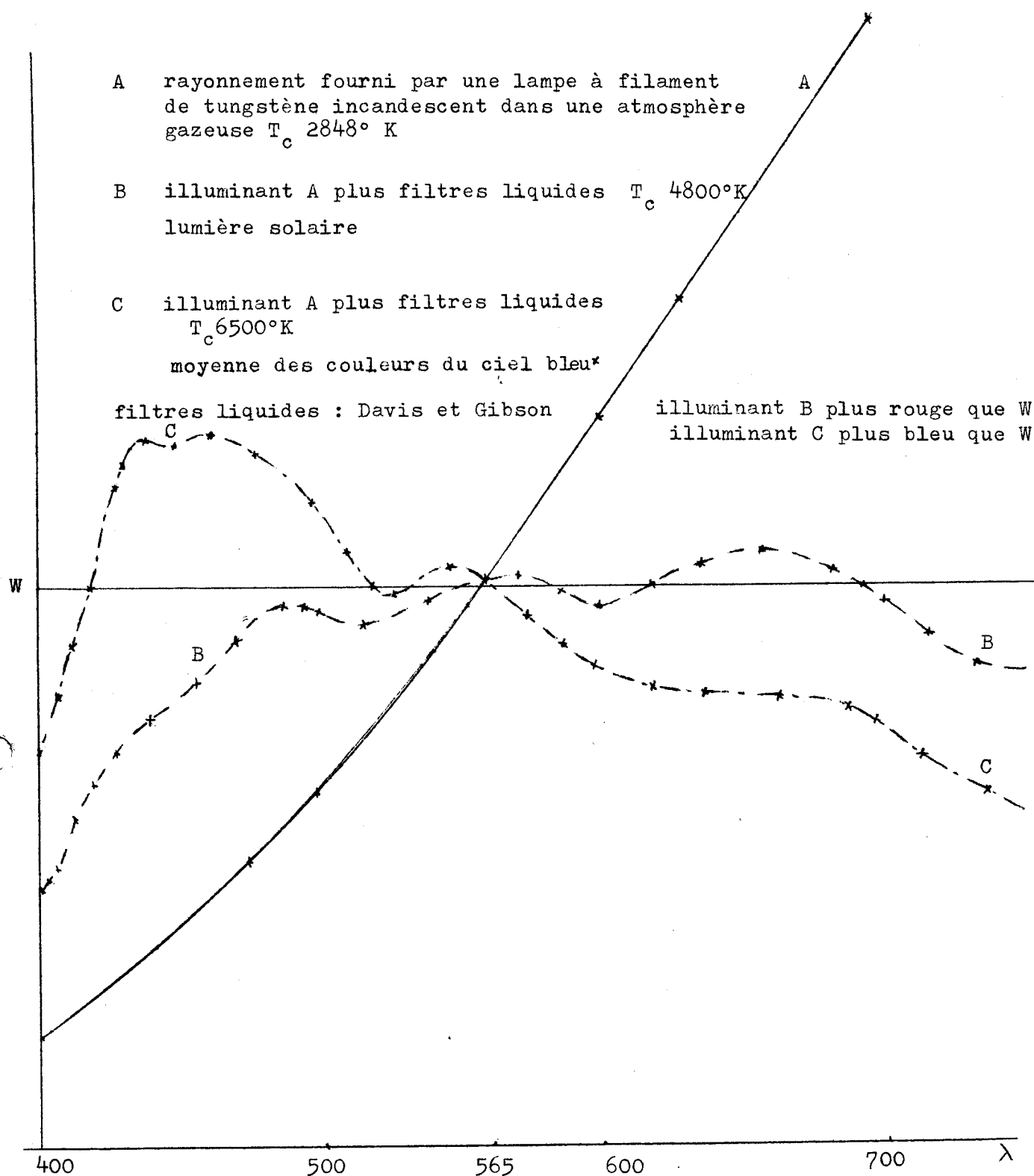
2°- intervention d'une zone rétinienne fovéale assez petite, mais pas trop

3°- élimination des efforts de fatigue et contraste.

En dehors des numérotations empiriques qui n'ont aucune valeur scientifique, deux méthodes systématiques sont utilisées pour le repérage des couleurs. L'une fait intervenir des mélanges de blanc et de couleurs pures, l'autre est basée sur la synthèse trichromatique.

Méthode monochromatique + blanc

L'expérience montre qu'une lumière L quelconque (non



ILLUMINANTS STANDARD C.I.E.

Correspondances entre les différents vocables selon les conditions d'emploi

Termes photométriques et colorimétriques	Termes d'usage courant	Termes des psycho-physio- logistes
Luminance	intense luminosité faible	Phanie
Facteur de luminance	clair clarté foncé	Leucie
Chromaticité {	vert jaune vif bleu orangé pâle violet rouge profond teinte pourpre rabattu	Tonalité Tonalité
	Facteur de pureté	Saturation

Chromie

pourpre) équivaut au point de vue action sur l'oeil moyen à un mélange en proportions convenables d'une lumière monochromatique L_λ de longueur d'onde λ bien choisie avec de la lumière blanche L_w cet équilibrage n'est possible que d'une seule façon.

Le rapport $p \leq 1$ des flux ou brillances de $\frac{L_\lambda}{L}$ est son facteur de pureté.

Si L_λ et L sont mesurés en unités colorimétriques leur rapport σ est dit facteur de pureté d'excitation on peut dire que λ (longueur d'onde dominante) caractérise la teinte de L et que p mesure sa plus ou moins grande saturation.

Une autre caractéristique doit être adjointe ce sera le facteur de transmission, pour les corps utilisés par transparence, le facteur de réflexion diffuse (ou facteur de brillance) pour les corps opaques mats.

Quand un corps ne diffuse qu'imparfaitement par réflexion la lumière incidente et en renvoie une partie relativement importante au voisinage des directions prévues par les lois de la réflexion régulière il est dit brillant ; dans le cas contraire, il est dit mat.

La méthode trichromatique

Elle repose sur l'emploi de trois lumières de référence leur choix est en grande partie arbitraire. Supposons selon la convention adoptée par la C.I.E. qu'il s'agisse des lumières monochromatiques

Rouge	Verte	Bleue-violette
700	546	436 m μ
L_R	L_G	L_B

ces trois quantités caractérisent la couleur L l'équilibre n'étant possible que d'une seule façon. Nous les appellerons composantes trichromatiques de L .

Le plus souvent, les mesures sont faites en valeurs relatives, on considère des nombres r , g , b proportionnels à R , G , B et de somme égale à l'unité ; on les appelle coordonnées trichromatiques. Quand on connaît deux quelconques de ces coordonnées, on est fixé sur la chromaticité ; on y adjoint si possible la brillance de la surface inanimée.

On appelle facteur de réflexion d'une surface donnée le rapport du flux réfléchi au flux incident total. Ce facteur de réflexion permet de classer les objets en clairs ou foncés, elle correspond en peinture aux termes valeur ou leucie. Ces expressions n'ont de sens que comparativement à des plages voisines sans quoi nous ne savons pas si nous avons un objet foncé très éclairé ou un objet sombre peu éclairé.

Les Atlas de couleurs

CHEVREUL a imaginé un recueil de couleurs sous la forme d'un cercle chromatique composé par les couleurs utilisées dans les ateliers de la Manufacture des Gobelins.

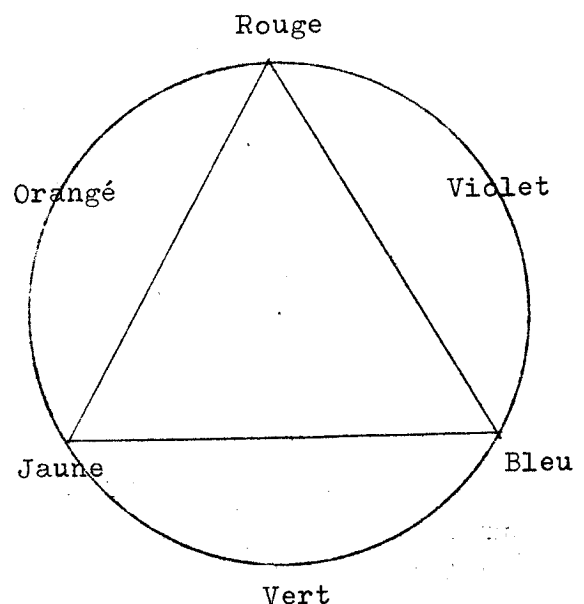
Trois couleurs de base, celles des artistes : Rouge, Jaune et Bleu.

Puis intercalées à égale distance les trois composées Orangé Vert Violet.

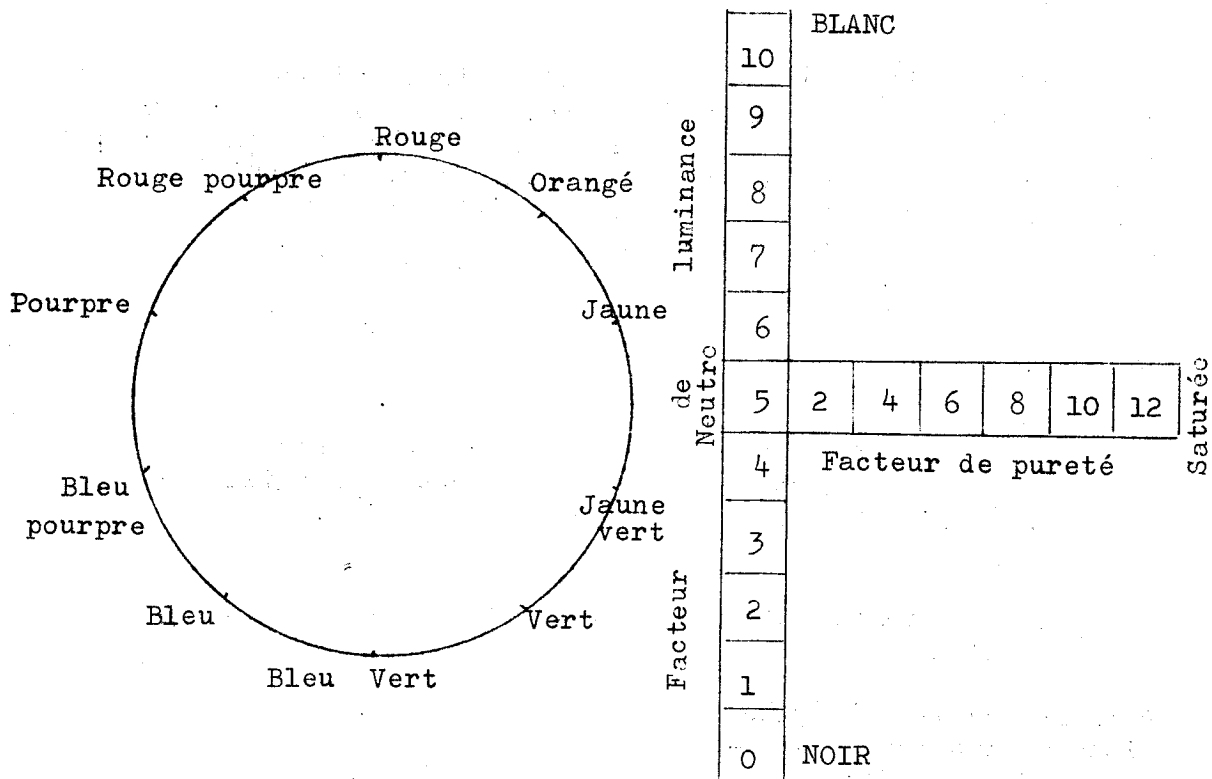
Les autres intermédiaires sont placées entre les composées pour obtenir 72 couleurs franches.

L'ensemble du cercle comporte 14.400 couleurs.

Actuellement on utilise les atlas de OSTWALD en Allemagne et de MUNSELL aux Etats-Unis. Ce dernier est le plus répandu ; il comporte 10 couleurs dominantes disposées sur un cercle.



Une gamme de 9 gris permet de désigner le facteur de luminance entre le blanc et le noir.



La saturation est chiffrée de la gamme de gris 0 à 12 pour la couleur saturée. L'atlas de Munsell comporte 400 échantillons.

- Couleurs chaudes et couleurs froides

C'est une propriété attribuée à certaines couleurs. On qualifie généralement de froides les couleurs bleu et violet et de chaudes les rouges orangés et jaunes.

Ces couleurs ont un effet psychologique assez curieux, qui est l'association du bleu avec l'idée de grand espace, de profondeur, c'est pourquoi on l'appelle aussi couleur fuyante. Par contre le rouge est une couleur saillante, qui donne du relief. On retrouve là une sensation qui résulte de l'accommodation ; l'effort d'accommodation nécessaire pour voir le rouge correspond à une mise au point sur un objet rapproché.

Contraste chromatique

L'étude des contrastes chromatiques sera faite expérimentalement par projections et essais individuels. En voici quelques éléments :

Sur une feuille de papier moitié blanche moitié noire, on colle deux disques identiques. La couleur du disque mis sur fond noir paraît plus claire que celle du disque mis sur fond blanc. Il est difficile de dire si la saturation est différente.

Le jaune et le rouge gagnent en vivacité sur fond noir, alors que le vert et le bleu perdent.

Réciproquement sur fond blanc.

contrastes simultanés	}	projections
contrastes successifs		

Tous les procédés modernes de photographie en couleurs provoquent une désaturation de la plupart des couleurs reproduites. Malgré cette désaturation physique, l'aspect subjectif de la plupart des couleurs d'une photographie en couleurs est habituellement très satisfaisant et quelquefois même ces couleurs paraissent trop saturées. Dans l'appréciation de la couleur d'un objet dans une photographie en couleurs, le terme de comparaison est la mémoire visuelle de la couleur d'objets analogues, mais ce terme de comparaison ne peut être que vague,

car la couleur d'un type d'objet varie très largement, par suite des effets physiques, physiologiques et psychologiques qui agissent différemment suivant la couleur et la brillance des objets voisins.

Par exemple une photo en couleurs prise par temps très couvert et vue en lumière intense suggérera un accroissement physiologique de la saturation relativement à la scène originale. Pour prendre un cas extrême, une photo en couleurs peut être prise au clair de lune, à ce faible niveau, l'oeil perçoit à peine les couleurs, qui paraissent donc très désaturées ; pour une pose suffisante, environ 1.000.000 de fois celle qui aurait suffi au soleil, les couleurs seront reproduites comme si la photo avait été prise au soleil ; cette photo, vue en lumière intense, donnera la sensation de couleurs considérablement plus saturées que celles perçues lors de la photographie.

L'effet psychologique connu sous le nom de contraste simultané des couleurs fait que la couleur apparente d'un objet varie suivant la couleur du fond sur lequel il se profile. On peut rattacher à cet effet l'influence d'un encadrement sombre. Un paysage vu à l'intérieur d'un local dont le mur, vu à contre-jour, paraît sombre autour de la fenêtre, paraît de couleurs beaucoup plus saturées que s'il est vu du dehors et il en est de même quand on regarde l'image formée sur le dépoli d'un appareil réflex.

Un autre effet, mi-physiologique et mi-psychologique, est l'influence de l'aire apparente d'un objet sur sa couleur ; une aire étendue paraît toujours d'une couleur plus saturée qu'une petite aire de même teinte.

En raison du vague de notre mémoire visuelle de la couleur des objets usuels, la désaturation des couleurs d'une photographie en couleurs passe le plus souvent inaperçue. Le fait qu'une photo en couleurs n'est pas seulement une réunion de taches colorées mais une image d'intérêt documentaire ou artistique tend d'ailleurs à masquer la désaturation.

Si de nombreuses circonstances font varier la saturation, il n'en est que peu qui fassent varier la teinte ; notre mémoire est plus précise sur ce point, et les erreurs de teinte

sont moins bien tolérées que les erreurs de saturation.

L'aspect d'une projection en couleur dépend de l'état d'adaptation des spectateurs, déterminé par l'image elle-même, par les images qui l'ont précédé au cours des dernières minutes, et, pour la plus grande part pour la couleur de champ environnant l'écran. Les effets de l'adaptation à diverses couleurs environnantes sont qualitativement bien connus. Habituellement, l'image présente une dominante approximativement complémentaire de celle de l'environnement. C'est pourquoi certains producteurs de films en couleurs protestent contre les encadrements colorés. Mais un encadrement neutre, même de très faible luminance, stabilise l'adaptation des spectateurs qui perçoivent ainsi plus aisément les variations involontaires de l'équilibre. Dans une salle presque obscure, c'est l'image projetée qui règle l'adaptation, compensant ainsi plus ou moins efficacement les variations accidentelles du coloris. La présence dans le champ visuel, au voisinage de l'écran, de surfaces éclairées, jouant le rôle de blanc de référence, facilite la constatation des variations de l'équilibre des couleurs, aussi est-il souvent recommandé de réduire l'éclairage, dans la région proche de l'écran. Le succès du cinéràma repose sur le fait que la région périphérique du champ visuel voit (flou, mais cela correspond à la vision habituelle) en dégradé, le décor se prolonger et le spectateur n'a plus cette impression de fenêtre que donnait le petit écran.

Lorsque des tons différents d'une couleur sont juxtaposés ils réagissent l'un sur l'autre, le ton clair paraîtra plus foncé et le ton foncé plus clair. La notion de contraste dépend uniquement de l'affectivité psychologique des individus, les sujets peuvent être réceptifs à des contrastes violents les autres ne supporteront que des contrastes doux, atténués. L'étude des sensations produites par des associations de couleurs nous introduit dans le domaine de l'esthétique qui doit satisfaire à des fonctions psychologiques définies.

Phénomène Le Grand-Geblewicz

Le GRAND et GEBLEWICZ ont décrit un fait physiologique très intéressant qu'ils ont mis en évidence par voie expérimentale.

Une source de lumière papillotante de grand diamètre apparent fortement colorée, très brillante, observée en plein jour en vision indirecte, donne rapidement la sensation d'une lumière continue et complètement incolore lorsque l'oeil restant immobile, la fréquence des interruptions atteint 40-50 par seconde. Le fait est d'une netteté frappante, mais ne se produit pas lorsque la rétine est adaptée à l'obscurité, il ne se produit pas non plus en vision directe ; pour cette raison, Le GRAND et GEBLEWICZ ont cherché l'interprétation dans la théorie de l'indépendance fonctionnelle des cônes et des bâtonnets, suivant les idées de PARINAUD mais la concordance manque entre cette théorie de dualité rétinienne et les conditions expérimentales dans lesquelles le papillotement produit la décoloration des lumières de brillance élevée.

Le Dr. POLACK a cherché l'explication du phénomène dans le jeu des images consécutives.

On sait qu'après l'action de la lumière la rétine conserve pendant un certain temps son état d'excitation, qui se traduit par des images dites consécutives. La première phase de ces images est positive, c'est l'image persistante ; la seconde phase est une image négative, elle succède à la première avec une rapidité variable, suivant les circonstances ; sa couleur est complémentaire de celle de la lumière initiale qui lui a donné naissance.

L'expérience montre que dans un éclairage ambiant suffisant la durée de l'image persistante est plus courte lorsque le diamètre apparent de la source observée est plus grand, lorsque sa lumière est plus brillante et son action plus prolongée lorsque la rétine est plus fatiguée et l'observation pratiquée en vision indirecte.

Toutes ces conditions se trouvent réunies dans le dispositif Le Grand et Geblewicz. Il en résulte que la durée de l'image positive ou persistante est réduite à une très faible fraction de seconde et que l'image négative apparaît presque instantanément après chaque excitation de la rétine ; ainsi, à chaque extinction de la source colorée, succède immédiatement l'image négative et avec elle la couleur complémentaire d'autant plus développée que celle de la source est plus saturée.

L'action se déroule comme si deux couleurs complémentaires l'une à l'autre, alternaient rapidement sur la rétine, en produisant par leur fusion la sensation de blanc ; mais le blanc obtenu par papillotement d'une lumière colorée est moins brillant ; on le comprend aisément, étant donné qu'il est dû à des effets de fatigue rétinienne.

Si l'on fait l'expérience avec une plage éclairée en rouge et si on la prolonge suffisamment, la couleur vert bleu complémentaire que développe l'image négative augmente avec l'accroissement de la fatigue rétinienne et finit par devenir prédominante dans la sensation. Dans ce cas, le blanc prend une légère teinte bleu verdâtre que l'on désigne sous le nom de blanc lunaire. La décoloration par papillotement d'une lumière colorée, observée en vision indirecte, semble bien avoir pour mécanisme l'alternance rapide sur la rétine de la couleur de la source avec sa complémentaire produite dans l'image consécutive négative. Ce mécanisme trouve une confirmation dans le fait que si l'on accélère la vitesse de rotation du disque obturateur pour augmenter encore le nombre d'interruptions par seconde et diminuer d'autant la durée de chacune d'elles, on finit par supprimer complètement le phénomène de la décoloration et l'on voit la plage reprendre sa couleur et donner l'impression de lumière continue. Il est évident que, dans ces conditions, la phase de l'image persistante, si courte soit-elle, devient suffisante pour couvrir les très courtes périodes d'interruption et pour assurer la continuité de l'impression lumineuse. Si l'on diminue le nombre d'interruptions pour en augmenter graduellement la durée, jusqu'à dépasser celle des images persistantes, on tombe au-dessous du régime de fusion et l'on voit apparaître dans le papillotement de la lumière colorée des taches de sa couleur complémentaire. Cette constatation fait penser qu'il ne serait peut-être pas impossible de réaliser même en vision directe le phénomène de Le Grand - Geblewicz ; il faudrait pour cela renforcer les conditions expérimentales susceptibles de faire abréger davantage la durée des images persistantes. L'une de ces conditions, la principale peut-être, est de produire une fatigue prononcée de la rétine par une exposition préalable et prolongée à la lumière colorée, très brillante, choisie pour l'expérience.

Harmonie des couleurs

On peut considérer l'harmonie comme la concordance des parties dirigée vers un but, ce qui n'impose pas un équilibre

entre toutes les parties. L'équilibre absolu risque de conduire à la monotonie.

La nature est une source d'exemples de couleurs harmonisées. Voisines les unes des autres des fleurs plaisent toujours, nous voyons rapprochés des tons les plus divers, souvent de valeurs différentes, qui contrastent entre eux mais le tout est harmonieux. Toutes ces fleurs appuyées sur un tapis de verdure plaisent même davantage. Il est à remarquer que le vert harmonise avec toutes les couleurs. Dans une prairie l'harmonie est permanente, que ce soit la marguerite blanche, ou la violette d'un violet intense. La consonance du coquelicot est trop évidente, trop facile comme un effet pour un débutant en peinture ou photographie en couleurs. Quoique bien souvent, si l'harmonie est obtenue en couleurs l'équilibre est rompu par le rapport des surfaces qui est certainement aussi délicat que l'accouplement des tonalités. Le tout est difficile à obtenir principalement quand il faut harmoniser à un rouge ou un jaune.

Le spectre solaire qui est un bel exemple d'un tout nous montre par sa faible proportion de jaune l'importance de son facteur de luminance. Cependant il ne faut pas généraliser cette loi d'harmonie qui veut qu'une composition soit harmonieuse quand le tout reconstitue un gris neutre.

Il semble que cette loi résulte de l'observation des images accidentelles ce qui laisse penser à un déséquilibre. Un tableau peut donc être harmonieux (au point de vue chromatique) même si l'addition de ses éléments ne donne pas un gris neutre. L'exemple du camaïeu est à noter, quoique produisant des images accidentelles de couleur complémentaire, donc il y a déséquilibre, cependant il est agréable à regarder. Le camaïeu peut être vu comme une vue noir et blanc viree ou regardée à travers un filtre coloré.

Remarque importante : camaïeu désigne une peinture monochrome que l'on nomme quelquefois grisaille.

CHEVREUL qui avait dans l'harmonie des couleurs dicté des lois distinguant six espèces d'harmonie, éprouva le besoin d'en ajouter une septième qu'il appela "harmonie de confusion", malheureusement nous pouvons difficilement l'imiter, seule la nature nous l'offre.

Dans un film en couleurs il est toujours très difficile de reproduire un paysage éclairé par le soleil. Le pouvoir différentiel de l'oeil suit la loi de Fèchner, mais cela vaut seulement pour les degrés moyens d'illumination, tandis que, aussi bien dans les grandes intensités que dans les petites, notre pouvoir différentiel s'émousse énormément et nous ne distinguons plus que très peu ou plus du tout des différences même très grandes.

Cela entraîne à bien des déceptions quand nous voyons en salle de projection un paysage séduisant lors des prises de vues, surtout lorsqu'une grande partie du champ est occupée par des prairies d'un vert très nuancé.

D'autre part, en salle de projection, il manque l'ambiance lumineuse présente à la prise de vues. Jamais aucun peintre ou photographe ne réussira un coucher de soleil comme on en voit en mer ; l'effet carte postale sera difficile à éviter.

Il est presque impossible d'établir des règles d'harmonies colorées ; toutes les couleurs sont harmoniques, toutes peuvent bien s'accompagner de quelque façon qu'elles soient mises pourvu qu'elles forment un tout équilibré.

LANGEL disait : "Il n'y a pas de véritables dissonances dans le monde des couleurs". L'harmonie dépend non seulement du choix des couleurs, mais de leur intensité respective et de leur rapport de surface.

Nous avons vu, dans l'étude de l'accommodation, la variation de mise au point imposée à l'oeil, quand nous regardons deux plages voisines de couleurs complémentaires. Il est indispensable d'éviter cette fatigue à l'oeil du spectateur. On y arrive en séparant les deux plages par un espace neutre ou en intercalant entre elles des couleurs de réfrangibilité voisine, ou en faisant varier le coefficient de pureté de l'une des couleurs.

Le noir exalte toutes les couleurs qui sont près de lui. Le blanc les atténue.

Effet psychologique des couleurs

Nous avons vu qu'il est d'usage de distinguer les couleurs chaudes (rouge, orangé, jaune) et les froides (bleu, vert, violet).

Des expériences ont montré qu'aucune corrélation n'existait clairement entre la sensation de chaleur et la sensation de couleur de l'ambiance. Une variation de couleurs n'entraîne pas une variation thermique de l'individu.

Nous devons toujours nous représenter l'action psychique qu'exercent sur nous les couleurs : vives, elles éveillent la gaieté, la légèreté (Exemple : une caisse claire, de même poids, de même dimension qu'une caisse sombre paraîtra moins lourde à l'ouvrier chargé de la manutention). On peut admettre qu'en général les couleurs froides sont calmantes, elles donnent la tranquillité, la mélancolie.

Le symbolisme des couleurs, né de l'action psychique des couleurs est toujours adopté dans les églises, les cours, étude héraldique, etc...

Le Rouge : vigoureux, impulsif, actif par sa forte analogie avec le feu et avec le sang, s'emploie pour exprimer la vie, les passions violentes, l'amour, la révolution. Tempéré par une couleur froide, il conserve son caractère de force, mais dépouillé de la violence et devient la couleur majestueuse, la couleur sacrée, tel est le pourpre. Coûtant très cher jadis, il est devenu une couleur royale.

Le Vert : donne l'idée de ce qui est robuste et frais, l'idée de printemps ; c'est la promesse pour l'agriculteur, il fut pris comme symbole de l'espérance.

On utilise le vert pour le traitement des maladies mentales telles que hystérie et fatigue nerveuse. Les tables des salles de jeu, des bibliothèques sont recouvertes de tapis verts.

Le bleu : rappelle l'idée du ciel, de la divinité, il symbolise la tranquillité, la protection, la fidélité ; sous l'influence de la lumière bleue, on constate une tension musculaire décroissante, susceptible de diminuer la pression sanguine et de calmer le pouls et la respiration.

Le blanc : symbole de pureté est froid, il exprime la tranquillité, le repos. Ainsi que le noir, il sert comme couleur de deuil.

Le noir est déprimant, c'est la couleur de la soumission, il rappelle à la pensée la nuit, l'épouvante, la cécité et il symbolise la tristesse.

Action physiologique de la couleur

Nous avons vu l'effet psychologique que peut avoir une couleur ; dans certains cas, la sensation psychologique a des influences physiologiques. En particulier, pour ce qui concerne les couleurs chaudes ou froides.

Quant à l'état d'enervement provoqué par le rouge, il est purement physiologique.

Le Dr MORIZOT a cité un atelier où, sur la demande du comité d'établissement, les murs furent peints en rouge. Peu de temps après éclatait une grève pour la première fois dans cet établissement.

Des enquêtes ont montré que les bruns et les jaunes sont défavorables aux personnes sensibles au mal de mer ou de l'air, alors que les verts et les bleus sont favorables. La thérapie par la lumière rouge a été appliquée avec succès pour des rougeoles et des scarlatines.

Les lumières bleue et violette sont utilisées depuis longtemps pour le traitement des névralgies. On peut lire dans la presse médicale les nombreux résultats obtenus par des bains de lumières colorées.

Voici un tableau emprunté à M. DERIBERE (la couleur dans les activités humaines).

Relations entre sons et couleurs

NEWTON voit un certain rapprochement entre la sensation des deux couleurs extrêmes rouge et violet, dont les longueurs d'onde sont comme un à deux, et l'octave musicale, où l'on a aussi le rapport de un à deux. UNGER cité par HELMHOLTZ avait tenté une harmonie esthétique dans le même sens, mais HELMHOLTZ la rejette, trouvant que, pas même dans la triade classique rouge-vert-violet, il n'existe de rapport dans les longueurs d'onde, exactement correspondant à celui de l'accord majeur de la musique. Toutefois, il n'est pas douteux que les sensations du rouge et du violet sont plus voisines que celles entre le rouge et le bleu ; que rouge, vert, violet extrêmes ont des rapports de longueur d'onde qui se rapprochent de ceux de do, mi, sol qui constituent l'accord majeur.

SYLVESTRE disait de DELACROIX que son rouge sonne comme la trompette guerrière et que du violet il tire de sourds gémissements.

De nombreux artistes contemporains, principalement parmi les abstraits, ont pris pour thèmes des classiques du jazz.

Le Relief

Pour avoir la notion de relief il faut employer une notion différentielle, en plus de la notion distance, la différence d'aspect que prennent les perspectives d'un même objet vu séparément par chaque oeil. Sur la rétine de chacun se forme une image à deux dimensions, c'est la différence entre ces deux images qui nous permet de voir trois dimensions.

En vision monoculaire, il nous est possible de juger d'une profondeur par un déplacement latéral de la tête.

Couleur	Association		Effets			Caractère	Symbolisme		Signalisation
	affective	objective	psychol.	physiol.	physique		religieux	profane	
Rouge	amour meurtre	feu sang	chaud dynamique énervant	pénétrant calorifique stimulant mental	très visible	vitalité action	charité amour énervement	amour	arrêt incendie
Orange	incandescence chaleur	feu orange coucher soleil	ardent stimulant brillant	favorise digestion stimulant émotif	très visible	peut calmer ou irriter			pièces chaudes
Jaune	gaîté	lumière solaire	gai spirituel dynamique	stimulant pour l'oeil et les nerfs peut calmer	très visible	gaîté	puissance science	ménage	danger
Vert	mauvaise influence	nature verdure	calme repos fraîcheur pacifique équilibrant néfaste	sédatif hypnotique reposant	très visible	patience inquiétude	vérité foi régénération	espérance mauvais oeil	secours ralentissement
Bleu	espace voyage	ciel eau	clair froid léger transparent atmosphérique calme aimé	calme apaisant	reposant pour l'oeil	calme repos	sagesse intelligence immortalité	sagesse science	attention
Pourpre	pompe mystère	fleurs	calme mélancolie délicatesse fraîcheur	calmant	adaptation difficile	respect satisfaction	dignité	dignité	mal défini

Couleur	Association			Effets		Caractère	Symbolisme		Signalisation
	affective	objective	psychol.	physiol.	physique		religieux	profane	
Violet	deuil dignité	fleurs évêques améthystes	fraîcheur	calmant	peu visible	tristesse mélancolie	pénitence espérance	pénitence	mal défini
Blanc	communion mariage clarté	fleurs	sobre clair	néant	lumineux	propreté sobriété	pureté innocence vertu chasteté	innocence vertu propreté	tracés de parcours
Noir	Ténèbres mystère	nuit mort	tristesse	repos	obscur	imagination malsaine	fins dernières	mort deuil	comme fond

A courtes distances l'accommodation seule peut nous renseigner sur le relief d'un objet. Les phénomènes qui entrent en jeu résultent d'une collaboration complexe des yeux et de diverses facultés cérébrales.

Le cerveau applique aux images rétiniennes la mémoire et l'expérience, l'imagination et la faculté d'établir des corrélations entre les sensations qu'un même objet peut produire sur les organes de la vue, du toucher et de l'odorat, par les efforts demandés aux muscles des yeux pour voir nettement, et à ceux des membres pour atteindre un objet regardé.

Les songes sont une preuve de l'intervention du cerveau dans la genèse des évocations visuelles.

Nos yeux sont écartés de 6 à 7 cm et ce faible déplacement du point de vue suffit à créer dans les deux images rétiniennes des différences qui sont à la base de notre sens de la profondeur. A courte distance ces images ne sont absolument pas superposables, la neutralisation sélective intervient dès que le champ visuel s'étend sur trois dimensions.

Si, par exemple, regardant par une fenêtre, nous fixons un point sur la vitre, nous repérons le point à l'infini situé dans l'alignement ; le cerveau ne perçoit qu'une image rétinienne du paysage en neutralisant l'autre image.

Pour savoir quel est l'oeil partiellement neutralisé il suffit de fermer l'oeil gauche en immobilisant la tête, si l'alignement précédent est conservé c'est l'oeil gauche qui est neutralisé. L'oeil droit dans ce cas est dit oeil directeur ; il sert inconsciemment à repérer une direction, à prendre un alignement.

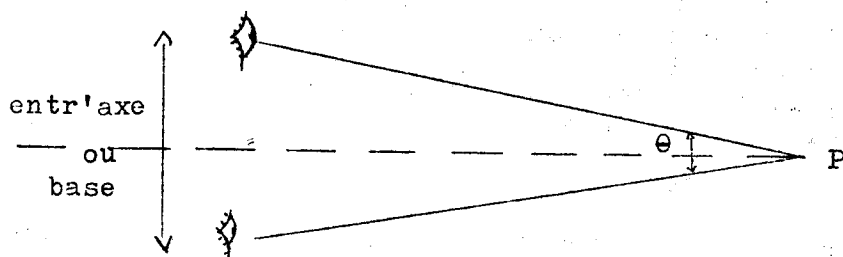
L'imagination intervenant presque toujours dans l'interprétation des images rétiniennes, il est nécessaire de la guider.

Beaucoup de gens à vue normale sont presque des borgnes

fonctionnels ; ils ne savent pas utiliser leurs deux yeux et ne se servent que de leur oeil directeur. Certaines peuplades sauvages ne saisissent pas le cinéma et sont incapables d'estimer un volume sur une photographie certainement par un manque d'imagination.

Pour un entr'axe de 64 mm des yeux (moyenne en Europe) l'angle de visée correspond à un écart de 1/10 de mm à 1 mètre, ou encore à l'écart entre un point situé à l'infini et l'autre à 2.500 m.

C'est l'angle θ qui nous renseigne sur la distance d'un objet



Quand nous regardons à l'infini,
 $\theta = 0$.

Si nous présentons aux deux yeux des images ou des couleurs très différentes, il y a antagonisme la plupart du temps, c'est-à-dire que l'image qui est la plus intéressante est seule vue et l'autre est neutralisée. Si l'intérêt est équivalent, il y a superposition par moment. Si par exemple, d'un oeil, nous regardons une mire verticale, de l'autre une mire horizontale, au début nous neutralisons l'une d'elles puis par moments les deux se superposent et nous voyons une grille, puis à nouveau une des images est neutralisée. Avec un peu d'entraînement on arrive volontairement à neutraliser la gauche ou la droite.

De même avec les couleurs si un oeil voit une plage bleue, l'autre une jaune, nous arriverons à voir une plage blanche lorsqu'aucune image ne sera neutralisée.

Troubles de la vision binoculaire

Une bonne vision binoculaire impose un bon équilibre des deux yeux ; cet équilibre doit être musculaire en ce sens que les mouvements des deux yeux dans leurs orbites doivent être exactement coordonnés sans tendance à la divergence ou à la convergence des axes. Si cet équilibre est defectueux, la vision binoculaire est habituellement impossible et le sujet neutralise une de ses deux images, il est devenu un borgne fonctionnel. Même sans que le sujet louche, il arrive que l'équilibre musculaire soit imparfait.

En plus du synchronisme parfait des deux yeux, il faut que les images formées soient absolument identiques. L'aniséiconie est le défaut de la vision qui donne des images inégales. Certains sujets particulièrement sensibles sont atteints de troubles (fatigue oculaire, migraines, etc...) dès que la différence relative des images atteint 1 %. A partir de 4 ou 5 %, la vision binoculaire devient impossible et une des images est neutralisée.

Phénomènes de Pulfrich

Un pendule oscille dans un plan parallèle aux yeux ; on place un verre fumé devant un oeil, les oscillations semblent se faire suivant une ellipse.

Cela provient du retard de la sensation qui est plus grand pour l'oeil moins éclairé le mobile est vu par chaque oeil en un point différent de sa trajectoire.

Cinéma en relief

L'impression de relief est donnée à l'observateur par deux images planes correspondant à la vision binoculaire, chacune des images étant vue par un seul oeil. Le plus simple est

évidemment le principe du stéréoscope qui permet d'examiner deux photographies l'une correspondant à l'oeil droit, l'autre à l'oeil gauche.

Ceci s'applique aux photographies. Le cinéma a d'abord utilisé les anaglyphes, procédé dans lequel on a une image verte et une orange, le spectateur porte des lunettes correspondantes. Mais ce procédé fatigue énormément la vue et ne permet pas de projeter des films en couleur.

Plus récemment on a utilisé la lumière polarisée. La prise de vue se fait avec deux caméras voisines dont l'entr'axe correspond à la base. A la projection deux appareils absolument synchrones projettent les deux films. Devant le hublot de chaque cabine on place un polaroïde dont les axes sont perpendiculaires l'un à l'autre. Le spectateur porte des lunettes à polaroïde de même orientation que ceux des hublots.

Ce procédé n'a pas eu le succès escompté à cause du port des lunettes et bien souvent une mauvaise orientation des polaroïdes fatiguait la vue, bien souvent un oeil voyait l'image qui ne lui était pas destinée.

L'apparence du relief est déjà donnée par le déplacement d'un objet devant un autre sur l'écran. En cinéma il y a deux catégories de procédés utilisés pour donner une sensation de relief : ceux qui ont la prétention de donner le relief ou l'annoncent dans un but publicitaire, et ceux qui le donnent réellement.

Dans les premiers, il existe une multitude de procédés dus à des inventeurs qui ont tous découvert une nouvelle théorie personnelle de la vision du relief, depuis le procédé qui prétend donner la sensation de relief en faisant la projection sur un écran sphéro-concave sous prétexte que la rétine est concave, jusqu'à celui qui déplace continuellement l'angle de prise de vue et sa distance de mise au point, sous prétexte que l'oeil n'est jamais immobile.

Le "Cinérama" et "Cinémascope" ont fait beaucoup de bruit ces dernières années tous deux font la projection sur un

écran beaucoup plus large que les écrans auxquels nous sommes habitués. Ni l'un ni l'autre ne donne le relief véritable. Ces systèmes ne sont autre chose que l'extension commerciale de l'expérience faite avec le procédé panoramique du Professeur CHRETIEN à l'Exposition Internationale de Paris en 1937 (écran de 10 mètres de hauteur sur 60 mètres de largeur).

Les projections panoramiques sont plus agréables que les projections usuelles. Couvrant davantage le champ visuel, elles mettent le spectateur dans une ambiance qu'il ne peut trouver quand il regarde un spectacle à travers la fenêtre que constitue un écran ordinaire.

Le relief sans lunettes

Le procédé français Savoye est une excellente solution de la vision du relief. Les deux vues du couple stéréoscopique sont ici placées sur la même bande. L'écran est à l'intérieur d'une cage tournante dont l'axe a une certaine inclinaison.

Les barreaux équidistants de cette cage ont une largeur qui est les $\frac{3}{5}$ de leur écartement et sont vernis en noir brillant. L'appareil étant immobile, on projette d'abord l'image droite sur l'écran à travers les barreaux. Ceux-ci occultent des bandes verticales dans la projection, mais l'oeil droit auquel est destinée cette projection la voit à travers les barreaux. Si la cage se met à tourner, les barreaux balaient toute l'image et la persistance de l'image sur la rétine ne permet de voir ni les barreaux qui tournent assez vite, ni le découpage de l'image sur l'écran. On observe la même chose si on fait l'opération avec l'autre image et l'autre objectif de projection.

Gros inconvénient le spectateur doit garder la tête immobile pendant toute la durée du spectacle. A Moscou le procédé Ivanoff est exploité de façon permanente. L'appareil de prise de vues est ici muni d'un système optique qui partage le champ visuel normal en deux demi-images stéréoscopiques. Pour la projection, on utilise un appareil ordinaire, muni d'un dispositif qui superpose les deux demi-images sur l'écran. Ce dernier comporte une grille radiale composée de 30.000 fils de cuivre qui jouent le rôle des barreaux de Savoye.

Tous ces procédés présentent de grosses difficultés d'exploitation pour les salles. Il est probable que la télévision

en relief sera au point avant que tous les cinémas puissent projeter des films en relief, sans que les spectateurs sortent avec de violentes migraines.

Enfin, de nombreux procédés à trames ou à réseaux statiques dont l'origine remonte à BERTHLER (1896) ne donnent une projection acceptable que pour quelques spectateurs, d'autre part une grande diffraction nuit à la qualité de la projection. Les procédés à grilles demandent une installation importante et présentent aussi de nombreux défauts.

Nous verrons en détail ces procédés dans les mécanismes du cinéma.

BIBLIOGRAPHIE

-:-

Yves Le GRAND
Optique Physiologique

Dr P.J. BOUMA
Les couleurs et leur perception visuelle

L. DERIBERE
Les couleurs dans les activités humaines

E. DEVAUX
La vision

P. ROUSSEAU
La lumière (Que sais-je ?)

Dr A. POLACK
La vision des couleurs et l'art pictural

-:-