

TÉLÉVISION : Perception visuelle humaine

V 1.00

J. Weiss

octobre 1998

1 ÉCLAIREMENT RÉTINIEN.....	3
1.1 Contextes usuels de luminance.....	3
1.2 adaptation de l'œil.....	3
1.3 fonctionnement sensoriel de la rétine (notions de base).....	4
1.3.1 les cônes.....	4
1.3.2 les bâtonnets.....	4
1.3.3 distribution des récepteurs dans la rétine.....	5
2 LUMINOSITÉ DES PLAGES NON TRÈS PETITES	7
2.1 Conditions de l'observation	7
2.2 Seuil différentiel de luminance.....	7
2.3 Echelle de sensation et réponse de transfert	9
2.4 Réponse CLARTÉ - LUMINANCE.....	10
3 ACUITÉ VISUELLE EN LUMINANCE	13
3.1 Réponse d'ouverture de l'œil.....	13
3.1.1 Image rétinienne et interprétation sensorielle	13
3.1.2 Acuité visuelle : définitions.....	13
3.2 Acuité visuelle sur optotypes.....	15
3.3 Contraste liminal	15
3.4 Influence de divers facteurs	18
3.5 Champ de vision	19
4 PROPRIÉTÉS DE LA VISION VIS-A-VIS DES COULEURS.....	21
4.1 Rappels de colorimétrie.....	21
4.1.1 Synthèses de couleurs	21
4.1.2 Blanc de référence	21
4.1.3 Primaires XYZ de la CIE.....	22
4.1.4 Perception visuelle des couleurs.....	25
4.2 Comportement de l'œil réel par rapport au système de la CIE	26
4.3 Acuité visuelle en chrominance.....	26
4.3.1 Réponse spatiale chrominance.....	26
4.3.2 Mire à évolution chromatique sinusoïdale autour du blanc.....	27
4.3.3 Contrastes associés de luminance et de teinte	28
4.4 Fusion des lumières périodiques, PAPILOTEMENT	29
4.4.1 Le papillotement ; fréquence critique	29
4.4.2 Principaux facteurs influençant le papillotement	29
4.5 Papillotement localisé de luminance	31
5 CHOIX DE LA FRÉQUENCE TRAME OU IMAGE.....	33
5.1 Restitution du mouvement.....	33
5.2 Contraintes dues au tube image.....	33
5.3 Contraintes dues au secteur	33

1 ÉCLAIREMENT RÉTINIEN

1.1 Contextes usuels de luminance

Du fait de la grande plage de luminance rencontrée dans les scènes naturelles, l'œil possède une forte capacité d'adaptation :

Gamme des éclairagements courants :

Soleil à 50 ° au-dessus de l'horizon par ciel clair	10 ⁵	Lux
Eclairage artificiel intense	10 ³ à 10 ⁴	Lux
Eclairage de bureau	500	Lux
Eclairage de circulation de nuit	50	Lux
Eclairage minimal de circulation	0,1 à 1	Lux
Pleine lune	0,2	Lux
Limite d'appréciation des formes.....	10 ⁻² à 10 ⁻³	Lux

La gamme des éclairagements précédents ne se rencontre jamais toute entière dans une scène réelle. Les variations de luminance d'un objet donné sont dues d'une part aux variations d'éclairage, atténuées par les lumières réfléchies et, d'autre part par les variations de réflectance, les noirs n'étant jamais à réflectance nulle.

Pour des scènes naturelles, éclairées par la lumière du jour, le contraste peut évoluer de 30 pour des scènes à éclairage faible très diffusé à 1000 pour des éclairages intenses. Une valeur moyenne de 100 à 200 est normale.

Les luminances d'objets considérés comme étant bien éclairés varient de quelques Candela par mètre carré à quelques dizaines de milliers de cd/m².

1.2 adaptation de l'œil

Pour répondre à ces domaines d'éclairage et de contraste, l'œil s'adapte à la luminance moyenne présente dans son champ de vision (lumière d'adaptation) et ce par 2 processus distincts :

- par réaction instinctive, le diamètre de la pupille varie en fonction de la lumière d'adaptation en diminuant lorsque celle-ci augmente. Cela équivaut à restreindre la plage de luminance perçue.
- par une variation de la sensibilité moyenne de la rétine qui traduit d'une manière non linéaire l'éclairage en sensation de luminosité (effet *Stiles-Crowford*).

La correction de sensibilité se fait de manière progressive, lorsque l'éclairement moyen d'adaptation varie brusquement, l'œil met un certain temps à s'adapter ; ce temps peut être de l'ordre de la minute, voire plus.

1.3 fonctionnement sensoriel de la rétine (notions de base)

La rétine constitue le traducteur IMAGE-INFLUX nerveux ; les cellules sensibles sont de 2 types :

1.3.1 les cônes

Ils agissent en vision photopique, c'est à dire lorsque la luminosité est moyenne à forte, et sont regroupés en 3 groupes mêlés dont les sensibilités spectrales complémentaires permettent l'interprétation trichrome des couleurs. Les cônes sont essentiellement regroupés dans la région située dans l'axe optique de l'œil, la fovéa ; la distance moyenne les séparant y est d'environ $2,2 \mu\text{m}$.

1.3.2 les bâtonnets

Ils permettent la vision scotopique, c'est à dire lors des faibles éclaircissements. La sensibilité scotopique de l'œil est maximale pour une longueur d'onde de 500 nm alors qu'en vision photopique, le maximum se situe aux alentours de 550 nm.

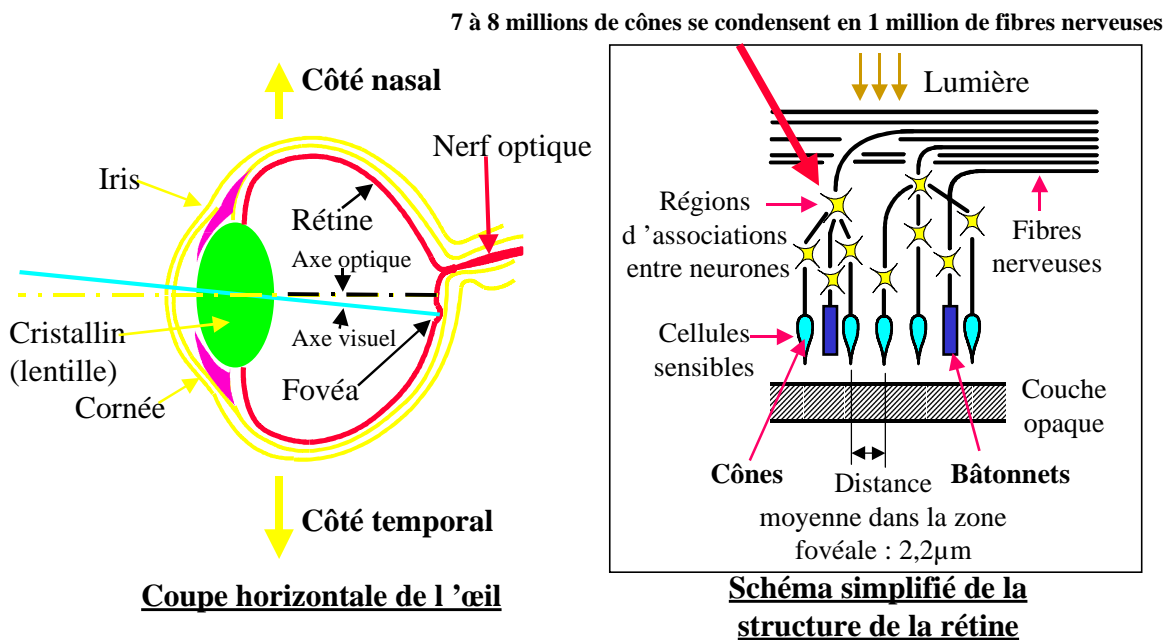


Fig 1.1 : Structure de l'œil et de la rétine

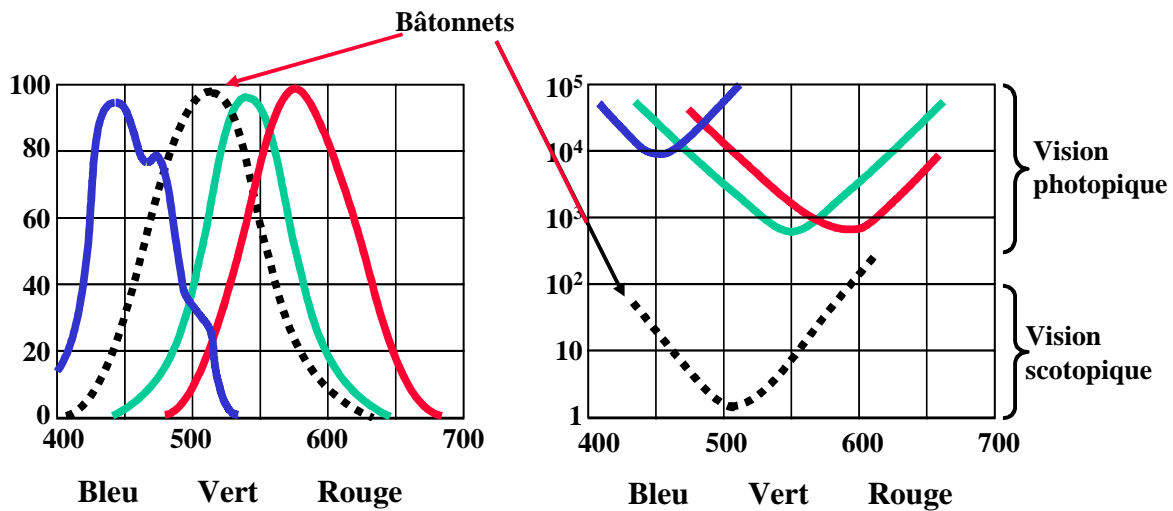


Fig. 1.2 : Sensibilités relatives des cônes et des bâtonnets

Il est important de noter que l'influence des cellules en bâtonnets n'est importante que pour la vision scotopique.

1.3.3 distribution des récepteurs dans la rétine

Il y a une très forte concentration de cônes dans la fovéa qui décroît très rapidement, et symétriquement, en vision périphérique. Pour les bâtonnets, il en va tout autrement car ils sont virtuellement absents dans la zone fovéale pour apparaître aux alentours de 15°, du côté nasal.

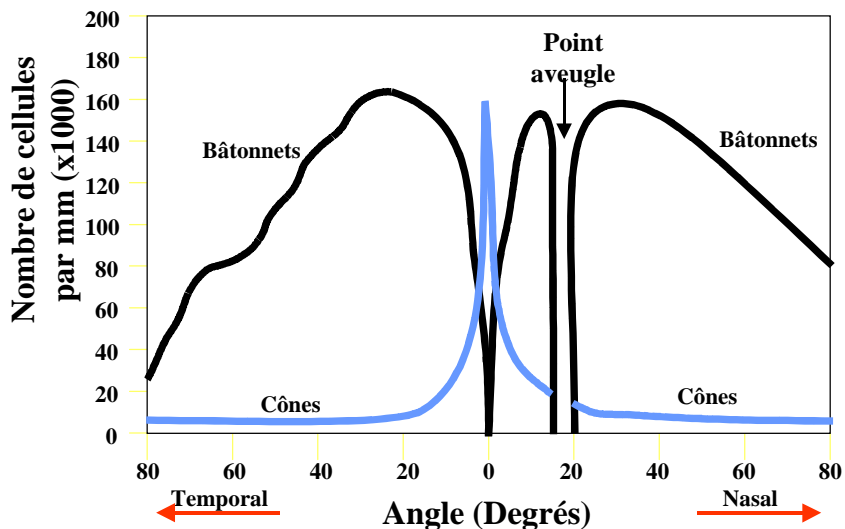


Fig 1.3 : Distribution des récepteurs dans la rétine

Les neurones associés aux cônes se groupent dans plusieurs couches intermédiaires avec une réduction du nombre de neurones jusqu'à la fibre du nerf optique qui transmet au cerveau l'information captée par les cônes.

Ces groupements sont de plus en plus importants en s'éloignant de la zone fovéale. Dans cette dernière, le nombre de nerfs est voisin de celui des cônes alors qu'en périphérie, un seul nerf correspond à de nombreux cônes ; ainsi, 7 à 8 millions de cônes se condensent en 1 million de fibres nerveuses.

Les groupements de cellules et les relations latérales plus ou moins complexes qui existent entre cellules voisines créent des contre-réactions qui influencent la traduction sensorielle de la vision.

L'excitation des nerfs étant dynamique, l'excitation des cônes doit être continuellement variable ; cela se fait de manière instinctive par des déplacements angulaires rapides et de faible amplitude du globe oculaire.

2 LUMINOSITÉ DES PLAGES NON TRÈS PETITES

2.1 Conditions de l'observation

L'œil apprécie la qualité d'une image en particulier par la reconnaissance des variations de luminance qui soulignent les formes, et, par l'intermédiaire des demi-teintes, qui donnent le contraste maximal entre les parties les plus lumineuses, les blancs et les parties les moins lumineuses, les noirs. Cette appréciation de la modulation de la lumière se fait sur des plages de faibles dimensions mais l'œil adapte sa sensibilité sur la luminance moyenne globale de l'image et, lorsque cette image est une faible partie du champ visuel, sur la luminance de l'image corrigée par l'action de la luminance du champ périphérique.

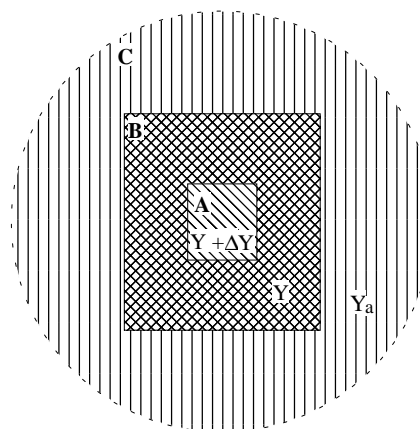
L'étude de la réponse de transfert de l'œil est menée dans des conditions d'adaptation fixes, caractérisées par une luminance d'adaptation : Y_a

L'appréciation des luminances sera faite sur une plage de l'image suffisamment grande pour éviter l'influence de la réponse d'ouverture, mais assez petite pour ne pas influencer l'adaptation. Si le signal d'entrée peut ainsi être bien défini (i.e. : de manière objective), il n'en est pas de même pour le signal reçu (l'impression de luminosité) qui est une sensation subjective. Tous les résultats que l'on peut obtenir des essais seront influencés par la dispersion des appréciations des opérateurs et des sensibilités réelles des yeux. Les résultats montrent que cette dispersion est importante.

2.2 Seuil différentiel de luminance

Une technique classique pour apprécier la réponse de l'œil consiste à déterminer les seuils différentiels de luminance sur une mire. La plupart des essais sont effectués en vision directe de la mire objet éclairée.

Le test se compose d'une plage A, de faibles dimensions, placée au milieu d'une plage B assez grande, elle-même placée dans un champ d'image de luminance constante Y_a considérée comme luminance d'adaptation. La luminance de B étant fixée à la valeur Y, la luminance est amenée de Y pour laquelle A est indiscernable dans B, à la valeur $Y + \Delta Y$ pour laquelle A devient juste discernable par l'opérateur.



ΔY est le seuil différentiel de luminance.

Les essais montrent que ΔY dépend de Y . On considère comme caractéristique la fraction de Weber $\Delta Y/Y$. Dans un tel essai (à adaptation constante), Y varie à partir d'un minimum correspondant à la première valeur $Y_0 = \Delta Y$ pour laquelle la plage se distingue du noir absolu. Cette première valeur Y_0 est la limite du noir subjectif. En dessous de cette luminance, l'œil ne reconnaît plus aucune nuance.

La valeur maximale de Y est mal définie, elle correspond à une valeur pour laquelle Y commence à influencer sérieusement l'adaptation. De plus, pour être réaliste vis-à-vis des images ou objets réels, le contraste maximal $C=Y_{\max}/Y_0$ n'est pas utilement supérieur à 500.

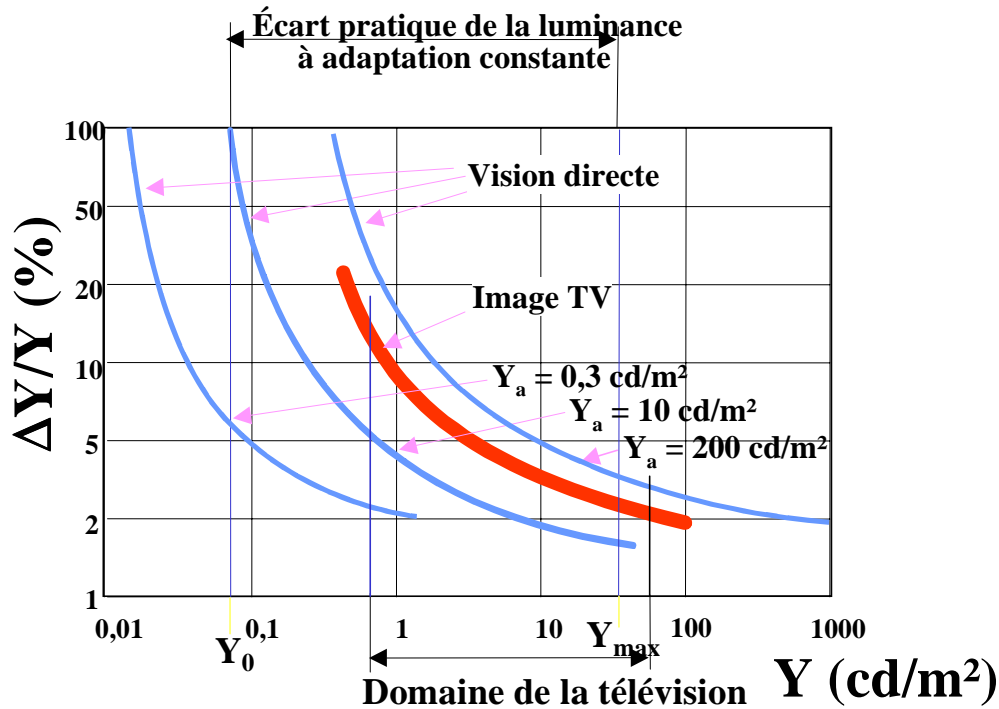


Fig. 2.1 : variation de la fraction de Weber dans différents cas

La figure 2.1 donne l'allure de la variation de la fraction de Weber pour une adaptation à lumière relativement faible (caractéristique des conditions d'observation de la télévision). La courbe montre que :

1°) pour Y élevé, $\Delta Y/Y$ tend vers une constante comprise entre 0,01 et 0,02.

2°) pour Y faible, $\Delta Y/Y$ croît. La valeur unité serait atteinte pour le premier échelon de luminance décelable (soit $Y = Y_0$).

Des résultats de mesure de la fraction de Weber sur une image de télévision (tube image) font apparaître une pente légèrement plus faible et un niveau de palier plus proche de 0,02.

2.3 Echelle de sensation et réponse de transfert

Du fait de l'écart fini ΔY qui sépare les luminances de 2 plages voisines tout juste discernables par l'œil, le nombre de tels échelons de luminance ΔY est calculable entre 2 valeurs Y_1 et Y_2 des luminances.

On en a en effet pour nombre d'échelons N : $N = \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dY}{\Delta Y}$

$$\text{soit : } N = \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{Y}{\Delta Y} \cdot \frac{dY}{Y} = \frac{1}{\text{Log}_{10} e} \cdot \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{Y}{\Delta Y} \cdot d(\text{Log}_{10} Y)$$

Cette relation conduit à une intégration facile sur la fonction $y = Y/\Delta Y$ donnée en fonction de $\text{Log}_{10} Y$. On obtient :

$$N = \frac{1}{0,34} \int_{x_1}^{x_2} y dx$$

La figure 2.2 donne le résultat de cette intégration pour les courbes $\Delta Y/Y$ présentées par la figure 2.1.

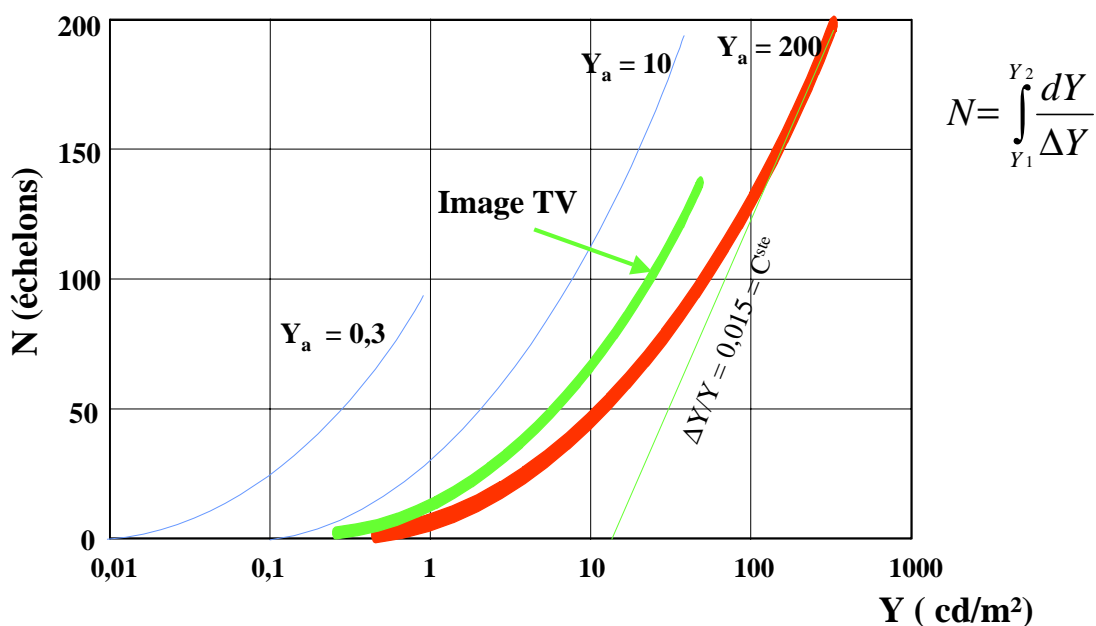


Fig. 2.2 : Nombre d'échelons de luminance perçus pour différentes adaptations

Remarques

Les essais montrent que ces courbes, tout en conservant la même forme générale, dépendent beaucoup des conditions du test.

Citons quelques effets :

- l'uniformité du champ environnant influence la valeur limite de $\Delta Y/Y$.
- la luminance d'adaptation joue sur le point de départ de la courbe, désigné par "noir subjectif" ; les figures 2.1 et 2.2 sont significatives de cet effet.
- la dimension de la plage de test a de l'influence lorsqu'elle devient très petite, c'est à dire vue sous un angle inférieur à 2° . La valeur de $\Delta Y/Y$ augmente lorsque la taille de la plage diminue, tout se passe comme si l'œil exerçait un effet de filtrage en atténuant les transitions pour les fréquences élevées.

D'autre part, le temps d'observation influence le discernement de ΔY comme si l'œil nécessitait une accumulation de stimulus.

2.4 Réponse CLARTÉ - LUMINANCE

La courbe 2.3 montre que la sensation de luminosité (grandeur subjective) d'un objet n'est pas proportionnelle à la luminance photométrique (grandeur objective) ; on désigne par clarté (notée W^*) cette sensation.

La valeur attribuée à la clarté d'une plage en demi-teinte dépend de la luminance de celle-ci mais aussi de l'environnement. On a cherché à donner une réponse normalisée pour l'observateur de référence :

$$W^* = 25\sqrt[3]{Y} - 17 \quad (\text{norme CIE 1964})$$

dans laquelle Y est la luminance avec, sous-entendu, l'hypothèse que la luminance $Y = 100 \text{ cd/m}^2$ est associée à la valeur voisine de $W^* = 100$ de la clarté.

Par ailleurs, on a défini la clarté psychométrique comme étant :

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad \text{avec } Y/Y_n > 0,01 \quad (\text{norme CIE 1976})$$

Dans cette expression, Y_n est la luminance de la couleur de la surface choisie comme stimulus blanc nominal. Une valeur de 100 cd/m^2 est très réaliste pour une application à la télévision (standard actuel) ; ainsi le blanc nominal correspondra à $L^* = 100$.

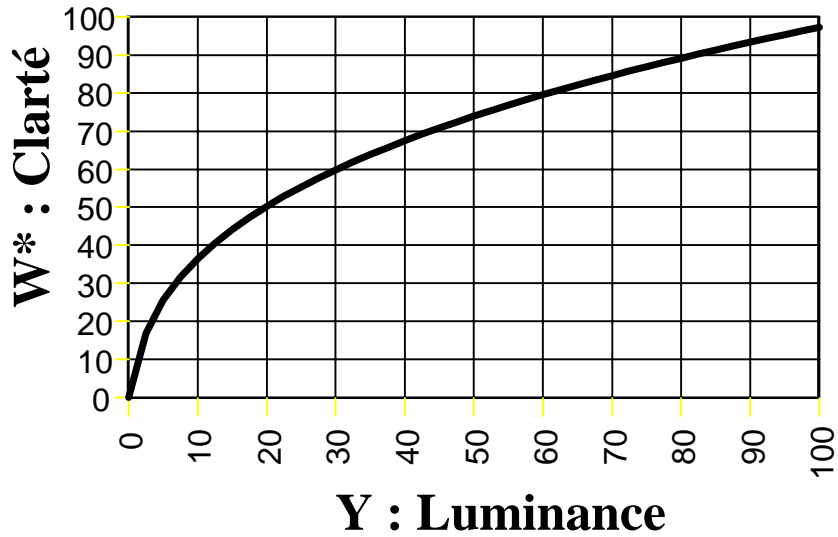


Fig. 2.3 : Réponse Clarté - Luminance

Les formules de la CIE ayant été établies lors de visions directes d'objets éclairés, leurs résultats ne sont pas toujours applicables au domaine de la télévision.

Certaines études menées sur des images de télévision tendent à considérer l'expression $W^* = a \cdot \sqrt{Y} + b$ mais faute de résultats cohérents, la formule de la CIE reste applicable.

Alors que la clarté d'une plage dépend de la luminance de l'environnement, la restitution de la teinte semble y être insensible.

3 ACUITÉ VISUELLE EN LUMINANCE

3.1 Réponse d'ouverture de l'œil

3.1.1 Image rétinienne et interprétation sensorielle

L'optique de l'œil donne pour image d'un point objet un spot de diffraction dont la partie principale a un diamètre voisin de $\frac{2,44\lambda f}{D}$ avec :

f : distance focale de l'œil (17 mm)

D : diamètre de la pupille (3 mm)

Ainsi pour $\lambda = 550$ nm, le spot a un diamètre de 6,6 μ m environ.

En fait, il faut ajouter le spot équivalent aux anneaux de la figure de diffraction et une part de lumière diffuse. Les aberrations apportent également leur contribution. On estime que la réponse d'ouverture est équivalente à celle d'un spot circulaire de densité constante de diamètre voisin de 20 μ m donnant une réponse d'ouverture dont la facteur de réponse rectangulaire Γ prend la valeur 0,5 pour une fréquence spatiale de la mire de *Foucault*, sur la rétine, voisine de 50 lignes/mm.

La réponse d'ouverture est également influencée par le fait que les cônes de la rétine n'agissent pas de manière indépendante mais sont, en un point donné, associés par les fibres optiques en un essaim ayant une surface nettement supérieure à leur surface propre. Cette association dépend du point de la rétine et dégrade tout particulièrement la réponse de l'œil en dehors de la zone fovéale.

Enfin il existe un effet de contre-réaction entre les cellules voisines qui se manifeste, de chaque côté d'une transition noir-blanc, par un effet de dérivation augmentant le contraste apparent de la transition (bandes de Mach) ; cet effet de bord apporte une contribution à la réponse d'ouverture pour les faibles fréquences spatiales.

La réponse d'ouverture réelle de l'œil s'exprime en sensation et n'est donc pas mesurable. Les mesures ne peuvent être que des mesures indirectes généralement basées sur la limite de reconnaissance des barres de la mire de *Foucault* ou d'un détail caractéristique d'un optotype, comme l'anneau de *Landolt*.

Le principe est le même que pour l'appréciation de la réponse de transfert pour l'étude des échelons de luminance.

3.1.2 Acuité visuelle : définitions

Les essais sur optotypes se basent sur l'observation d'une dimension caractéristique de l'optotype qui est soit la largeur d'une ligne de la mire de Foucault, soit l'ouverture de l'anneau de Landolt. La figure 3.1 montre que l'œil voit la dimension caractéristique S sous un angle α . A la limite de visibilité de l'optotype, cet angle prend une limite α_0 .

On nomme acuité visuelle la valeur $A_v = 1/\alpha_0$ où α_0 est exprimé en minutes d'angle.

Deux autres unités sont utilisées lorsque l'optotype est la mire de Foucault :

La fréquence spatiale f_s (en lignes/mm) est utilisée pour caractériser l'image sur la rétine, ou sur la mire.

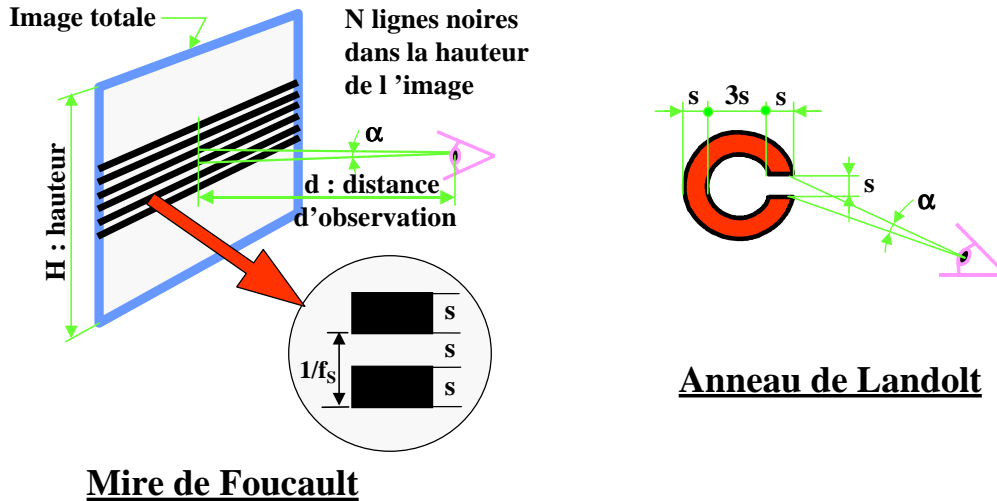


Fig. 3.1 : Définition des optotypes

Le nombre de lignes dans la hauteur de l'image N est une unité caractéristique de la télévision ; cette unité suppose que la mire de Foucault, horizontale, occupe toute la hauteur d'une image regardée à une distance d et de hauteur V . Pour la mesure, on utilise comme paramètre la distance relative d'observation d_{ob} ($d_{ob} = d/V$), souvent compris entre 4 et 6 pour la télévision standard.

La valeur de N est le nombre de lignes noires dans la hauteur de l'image ; la figure 3.1 donne la géométrie qui réunit les 3 unités, à savoir :

$$\text{Angle en radians} : \quad \alpha(\text{rd}) = \frac{S}{D} = \frac{V}{2Nd}$$

$$\text{Angle en minutes} : \quad \alpha(') = 3430 \cdot \alpha(\text{rd})$$

$$\text{Acuité visuelle} : \quad A_V = \frac{1}{\alpha(')}$$

$$A_V = 2,91 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{2Nd}{V} = 5,82 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot d_{ob}$$

$$\text{En particulier, pour } d_{ob}=4, \text{ on obtient : } A_V = 2,33 \cdot 10^{-4} \cdot N$$

$$\text{La fréquence spatiale est : } f_s = \frac{N}{V} \text{ en lignes/mm}$$

Il est pratique également de caractériser la vision de la mire par la fréquence spatiale visuelle f_v (en cycles/°) correspondant au nombre de périodes spatiales vues sous un angle de 1°. Une mire de fréquence visuelle f_v correspond à une valeur $A_v = 30/f_v$ de l'acuité visuelle.

3.2 Acuité visuelle sur optotypes

La mire de Foucault et l'anneau de Landolt sont l'optotype les plus fréquemment utilisés pour apprécier l'acuité visuelle ; la limite correspond à la reconnaissance de la structure rayée pour la mire et à la position de la coupure pour l'anneau.

Les résultats dépendent des conditions d'adaptation (luminance du champ périphérique), de la luminance du blanc Y_b et du contraste caractérisé par la valeur $M = (Y_b - Y_n)/Y_b$ où Y_n est la luminance de la zone sombre ; ces 2 facteurs sont très importants et la figure 3.2 montre une série de résultats obtenus.

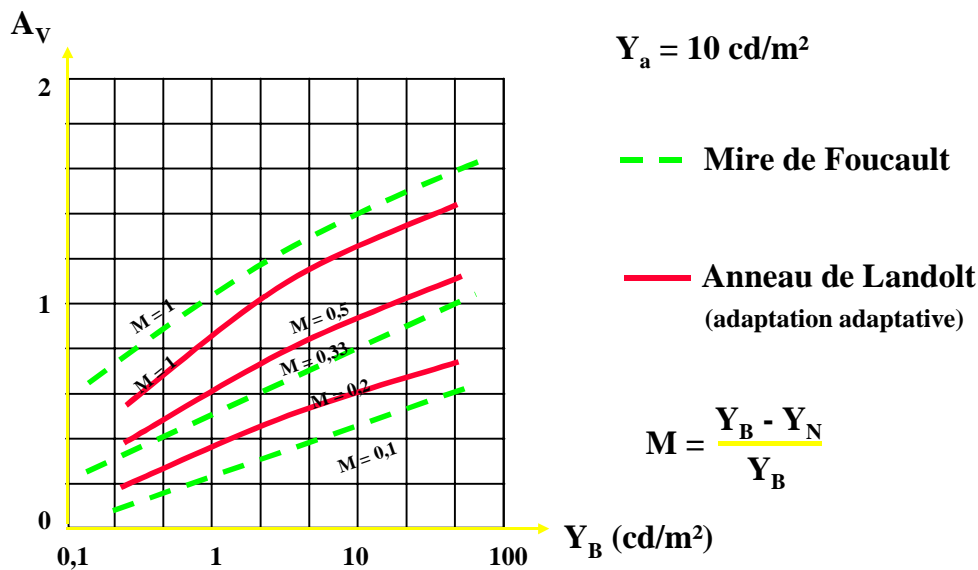


Fig. 3.2 : Variations de l'acuité sur mires optotypes

3.3 Contraste liminal

Les expériences sur la reconnaissance des optotypes associent la valeur limite de l'acuité visuelle à une certaine profondeur de modulation limite de l'image lumineuse sur la rétine, limite qu'il n'est pas nécessaire de préciser car le résultat dépend aussi de la réaction nerveuse.

Pour des mires à très basse fréquence spatiale, c'est à dire pour des plages larges, il est normal que la reconnaissance corresponde à un contraste $\Delta Y/Y$ égal à la fraction de Weber. En prenant comme valeur limite $\Delta Y/Y = 0,015$, cette valeur correspond à -36 dB, en accord avec les mesures effectuées en télévision sur une structure d'interférence fixe sur l'image.

Lorsque la fréquence spatiale augmente, il y a d'abord une certaine augmentation de l'acuité visuelle ; cette augmentation est la conséquence des liaisons entre les cellules nerveuses et la rétine qui améliorent, par contre-réaction, le contraste au voisinage des transitions.

La profondeur de modulation limite diminue d'environ 6 dB pour une fréquence spatiale correspondant à une valeur de N un peu inférieure à 100 lignes. L'interprétation de la réponse de l'œil peut être présentée de diverses manières :

Les résultats donnés sur la figure 3.2 correspondent à des essais effectués à adaptation variable sur la luminance du blanc qui constitue le fond de la plage d'observation.

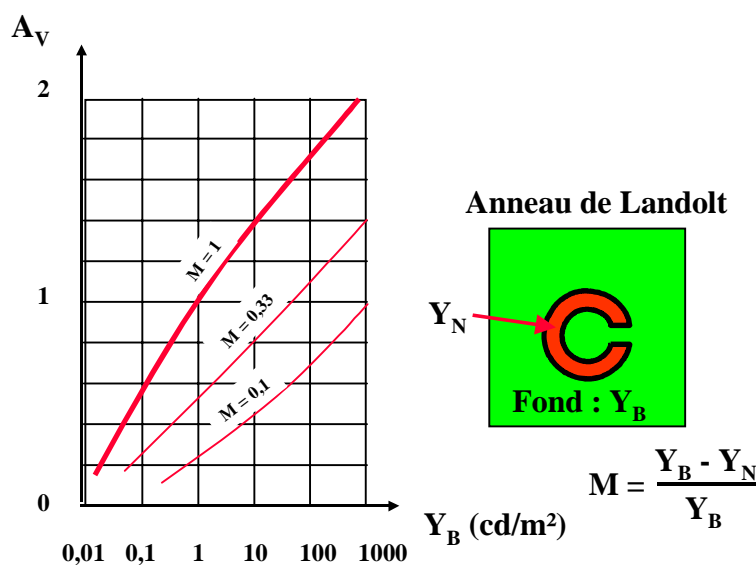


Fig. 3.3 : Variations de l'acuité visuelle sur les anneaux de Landolt

La figure 3.4 donne une interprétation de la relation entre acuité visuelle et profondeur de modulation qui se vérifie pour plusieurs types d'optotypes.

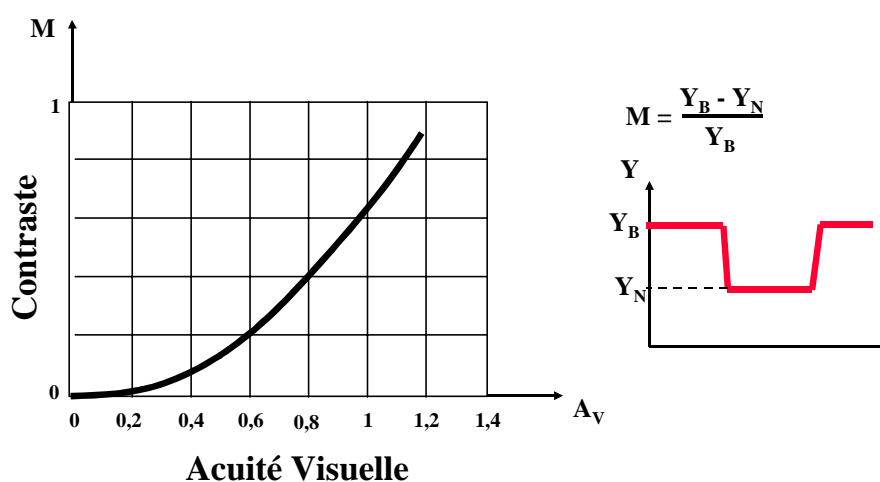


Fig. 3.4 : Fonction de réponse d'ouverture de l'œil ($1/M_0 = 120$ à 140)

Une analyse plus fine de l'acuité visuelle pour des faibles contrastes est obtenue en prenant pour ordonnée l/M ; on trouve la présence d'un maximum correspondant à un contraste M_0 avec $1/M_0$ de l'ordre de 120 à 140 (soit 45 dB). La courbe 3.5 représente les variations du rapport M/M_0 avec A_V , courbe que l'on peut considérer comme constituant la réponse d'ouverture de l'œil.

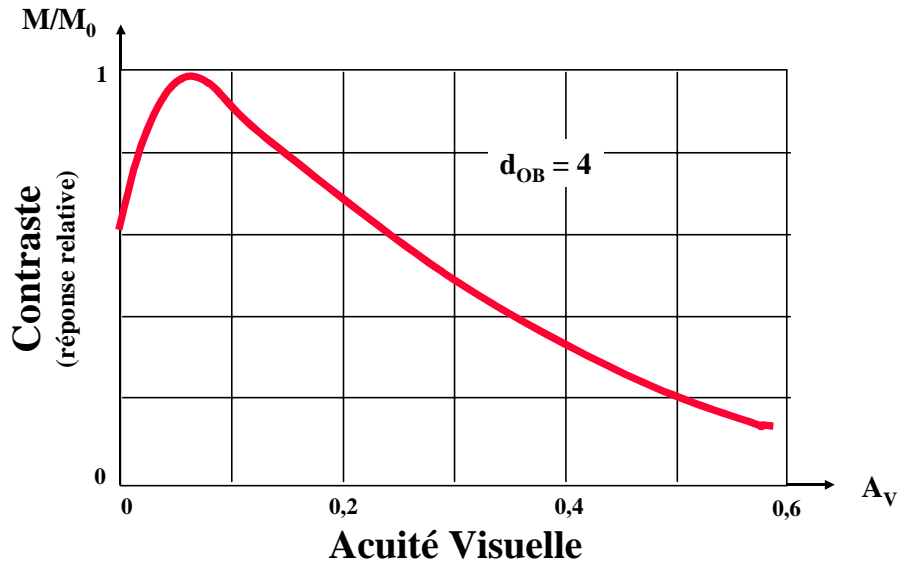


Fig. 3.5 : Réponse d'ouverture de l'œil

Pour les fréquences spatiales croissant au-delà de ce maximum d'acuité visuelle, 2 phénomènes se conjuguent pour diminuer l'acuité, ce qui conduit à une valeur $\Delta Y/Y$ de plus en plus grande pour la limite de reconnaissance de la mire.

Il est à noter que :

- d'une part, la réponse d'ouverture de l'optique de l'œil diminue le contraste de la mire sur la rétine,
- d'autre part, l'acuité réelle de la rétine diminue rapidement lorsque la fréquence spatiale augmente du fait des interactions entre les neurones.

Ces "effets de bord" (bandes de Mach) sont représentés par la figure 3.6, la clarté manifeste, aux transitions, un effet de dépassement qui accroît le contraste apparent de la transition (si cette dernière a une raideur suffisante).

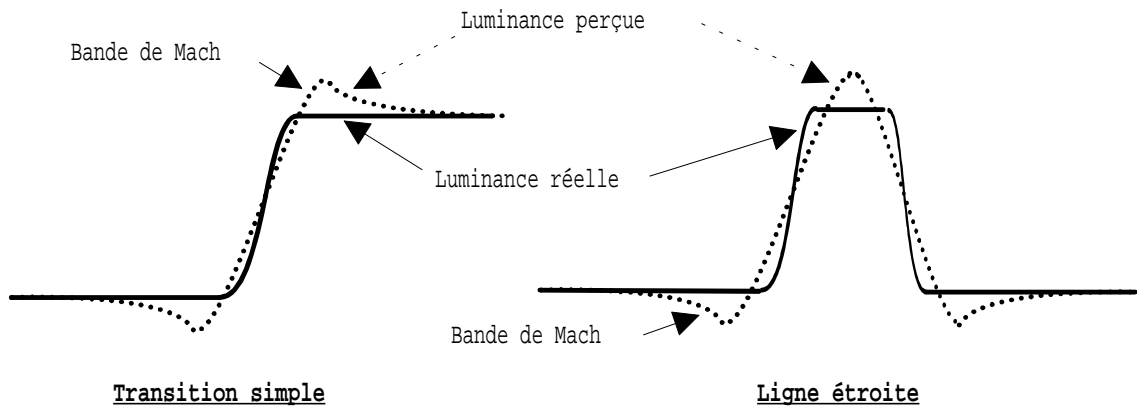


Fig. 3.6 : Effets de bord dans la vision des transitions de luminance

Ce phénomène a pour conséquence d'améliorer la finesse apparente d'une image lorsque le contraste augmente ; cela est très favorable, dans les conditions d'observation de la télévision.

3.4 Influence de divers facteurs

a) Influence du champ visuel

La réponse dépend de la dimension du champ visuel, comme le montre la figure 3.7 où sont portés les résultats obtenus avec des champs de 2° et de 10° ; les effets des interactions nerveuses dans la rétine s'étendent donc sur une assez grande surface puisque, dans les 2 cas, le test est effectué en vision fovéale.

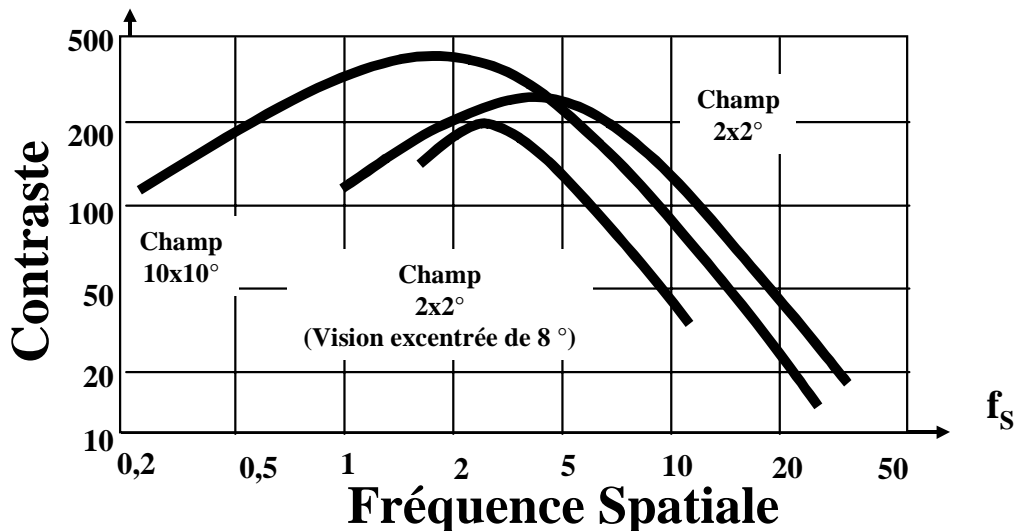


Fig 3.7 : Effets divers influençant la réponse d'ouverture

b) Influence de l'orientation de la mire

La vision n'est pas isotrope ; certains essais tendent à montrer que le pouvoir de résolution est maximal pour une mire horizontale ou verticale et diminue avec l'inclinaison, pour être minimal pour un angle de 45° ; la perte de sensibilité pourrait atteindre 50 %.

c) Influence du mouvement de la mire sur l'acuité visuelle

La réaction sensorielle a une certaine inertie, de l'ordre de 0,1 s qui est mise en évidence, par exemple, par la vision des étoiles filantes vues comme un trait lumineux, ou encore la disparition du papillotement pour les éclairagements modulés.

Lorsque l'optotype observé est mis en mouvement assez rapide devant l'observateur, l'acuité visuelle diminue. Quelques expériences menées sur les anneaux de Landolt montrent que cette diminution est sensiblement linéaire avec la vitesse de déplacement ; A_V est diminué par 2 pour une vitesse angulaire de 50 à $60^\circ/s$.

Cependant, pour des vitesses de déplacement faibles, l'effet est opposé : l'acuité visuelle augmente ; le déplacement favorise le processus de réactivation sensorielle de la rétine qui est, sur des images fixes, obtenu par des déplacements instinctifs de l'œil lui-même.

d) Influence de l'excentricité de la vision

L'acuité visuelle est maximale sur l'image qui se forme dans la zone fovéale de la rétine ; c'est dans cette zone que la finesse d'analyse de l'image par les cônes est la plus grande par suite de la faible dépendance des cellules entre elles. Par contre, en s'éloignant de cette zone, l'acuité visuelle diminue. Certains résultats indiquent que l'acuité visuelle est divisée par 2 pour un angle d'excentricité de 2° et divisé par 10 pour un angle d'excentricité compris entre 10 et 20° .

3.5 Champ de vision

L'acuité visuelle élevée de la zone fovéale correspond à un angle de vision de 3° environ. L'acuité visuelle est jugée médiocre en dehors de cette zone ; cependant, psychologiquement, la sensation globale d'une image, principalement dans le cas d'une image artistique qui s'interprète aussi en terme de réalisme ou d'agrément, est inséparable de la perception du champ d'environnement de la zone fovéale.

L'observateur oriente le regard par un perpétuel mouvement de l'œil pour diriger l'axe fovéal vers la partie de l'image retenue pour une analyse fine. La zone proche constitue une zone de surveillance dont l'interprétation permet l'orientation rapide de l'œil vers tel détail choisi instinctivement malgré une acuité faible et sans mouvement de la tête. Cette recherche porte sur certains détails de l'image qui suscitent un acte intellectuel d'interprétation.

Une troisième zone, dite zone d'impression induite, renseigne sur la structure des grandes masses de l'image et surtout de leur mouvement, ce qui peut induire l'orientation volontaire du regard par le mouvement conjugué de la tête et du globe oculaire.

Enfin la zone de vision latérale, jusqu'à la limite géométrique de la zone perçue, participe encore à l'appréciation de l'espace et, en particulier de la présence d'objets en mouvement rapide, incitant,

par exemple des réactions de défense ou de réponse. La figure 3.8 montre la dimension angulaire des différentes zones citées, pour un œil immobile.

En pratique, si le mouvement du globe oculaire est permanent et rapide, ce mouvement est angulairement limité et le mouvement de la tête vient ensuite compléter l'orientation avant que le corps entier ait à participer à la recherche de l'image. Pour une recherche cadrée, tenue sur une durée assez longue, la tête s'oriente pour centrer la recherche angulaire. Pour une recherche temporaire, il y a conjugaison d'une rotation de la tête limitée et complétée par une rotation moyenne du globe oculaire. La figure 3.8 montre les valeurs angulaires approximatives de ces mouvements.

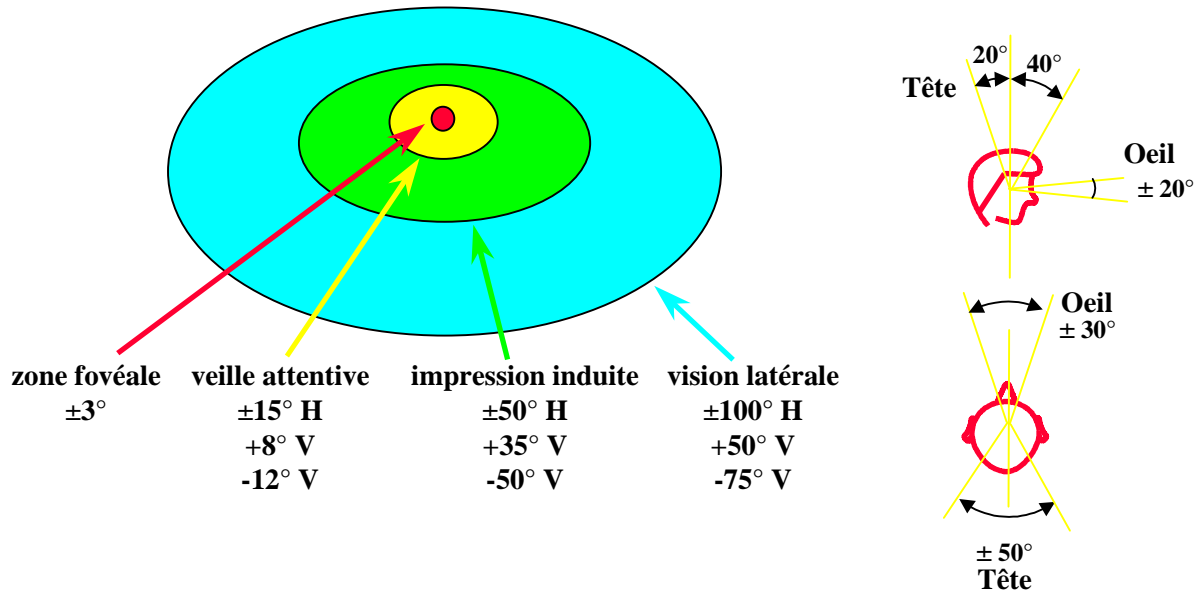


Fig. 3.8 : Zones d'action de la vision oculaire

4 PROPRIÉTÉS DE LA VISION VIS-A-VIS DES COULEURS

4.1 Rappels de colorimétrie

4.1.1 Synthèses de couleurs

Les systèmes de traitement d'informations couleur exploitent 3 primaires pour réaliser la synthèse de couleurs. La figure suivante présente 2 approches suivant le type de synthèse employé

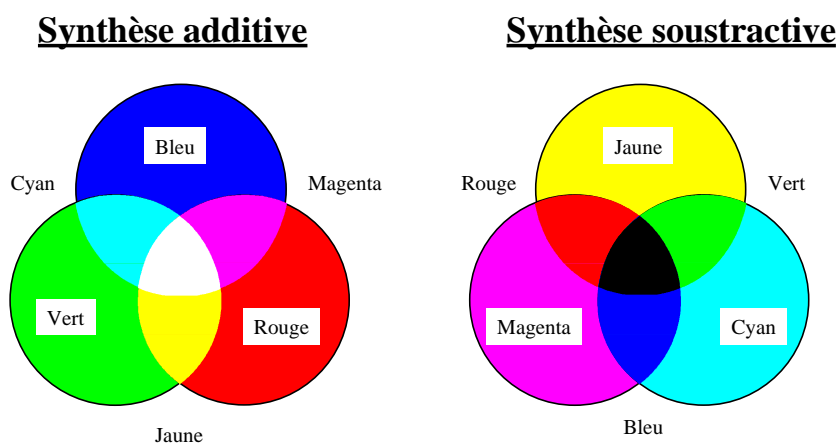


Fig. 4.1 : Synthèse de couleurs

La télévision et la photographie et l'informatique exploitent la synthèse additive (base RVB) ; la peinture et l'impression exploitent la synthèse soustractive (base CMJ).

4.1.2 Blanc de référence

La base de synthèse doit pouvoir être normalisée de manière à ne pas apporter de distorsion de couleur lors d'un traitement ; pour cela, il faut définir les longueurs d'onde et la pondération des primaires employées.

La couleur de référence d'une base est le BLANC, on le référence par rapport à la radiance d'un corps noir porté à une certaine température ; celle-ci a l'expression suivante :

$$\text{Radiance du corps noir : } R(\lambda)d\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \text{ en W/m}^2 \text{ (T en } ^\circ\text{K)}$$

On obtient : $R_{\text{total}} = \sigma T^4$ et $\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2900$ (loi de Wien)

La figure suivante présente le spectre de quelques "Blancs de référence".

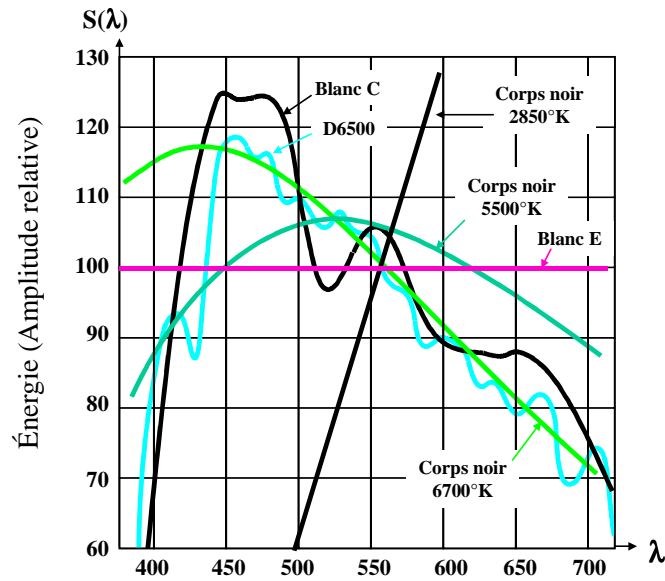


Fig. 4.2 : Blancs de référence

Parmi les "Blancs de référence" rencontrés dans la nature et dans des systèmes, on trouve :

- Blanc A : Tungstène porté à 2848 °K
- Blanc B : Jour à midi en été (température de couleur de 4800 °K)
- Blanc C : Ciel nuageux (température de couleur de 6700 °K)
- Blanc D₆₅ : Norme UER (température de couleur de 6500 °K)
- Blanc E : Égale énergie (spectre uniforme)
- Blanc N : Télévision N&B (température de couleur de 13000 °K)

4.1.3 Primaires XYZ de la CIE

Les cônes donnent une vision trichromatique (RVB), comme le montre la figure suivante, avec un maximum de sensibilité aux alentours de 550 nm (couleur verte).

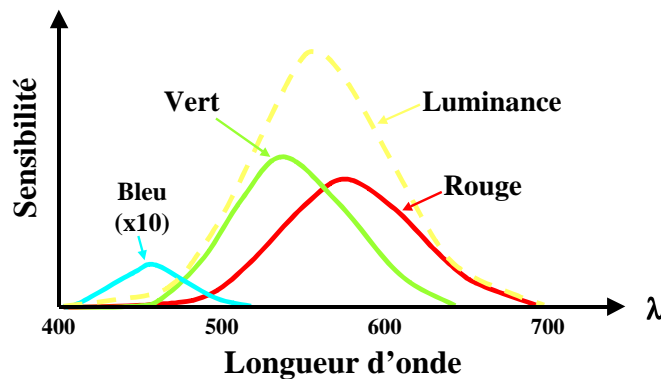


Fig. 4.3 : Sensibilité spectrale des cônes

Si on utilise une base RVB pure, on ne peut **pas** obtenir toutes les longueurs d'onde du domaine visible par la somme des 3 primaires, à moins d'utiliser des **coefficients négatifs**.

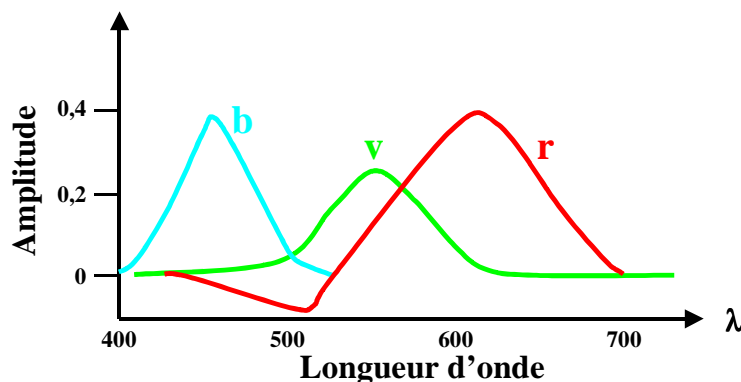


Fig. 4.4 : Synthèse de couleurs RVB par des couleurs pures

Pour remédier à cela, la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.) a défini 3 primaires X, Y et Z dont la réponse spectrale est donnée par la figure suivante.

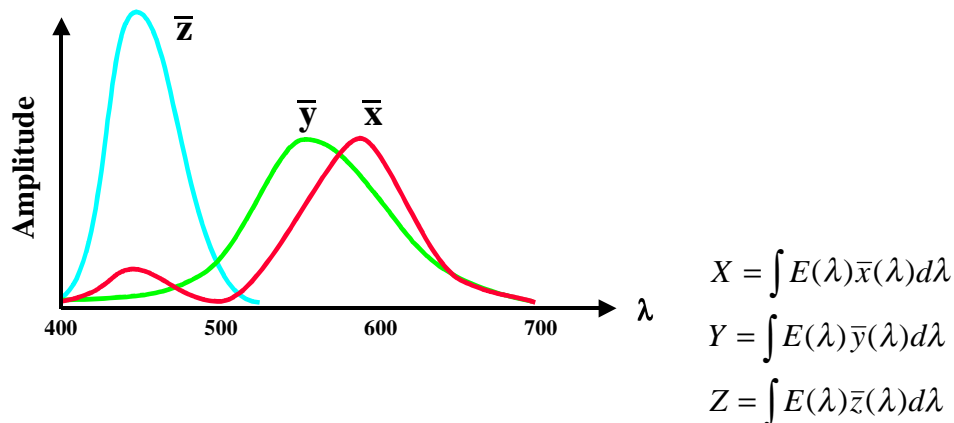


Fig. 4.5 : Réponse spectrale des primaires XYZ de la CIE (1931)

On peut ainsi reconstituer toutes les couleurs dans l'espace XYZ ; les couleurs visibles occupent dans cet espace, un cône de section en forme de "fer à cheval". On s'intéresse à un plan coupant ce cône de coordonnées $X + Y + Z = 1$, on peut alors représenter sur un diagramme bidimensionnel (xy) l'espace occupé par les couleurs visibles.

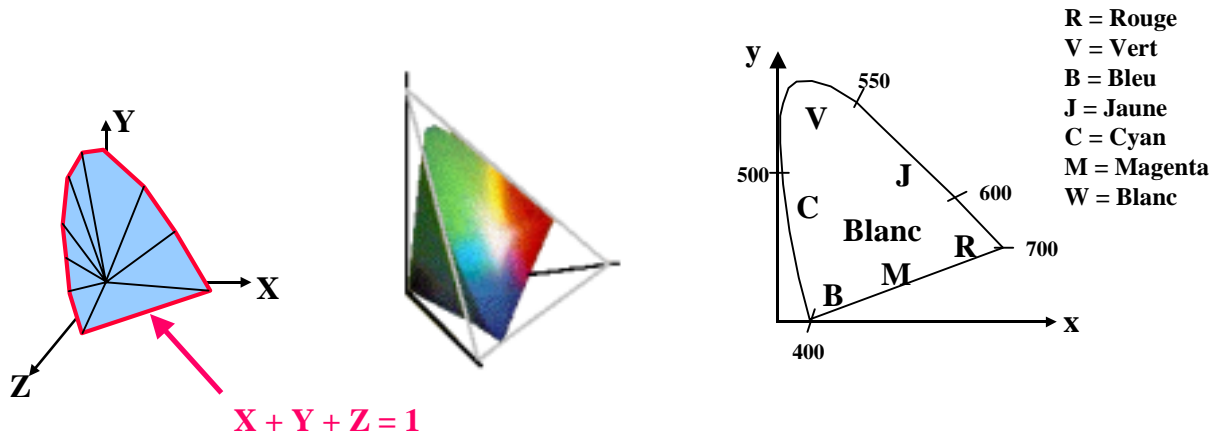


Fig. 4.6 : Construction du diagramme xy de la CIE (1931)

Le pourtour de ce diagramme est constitué des couleurs "pures" (monofréquentielles), et on retrouve les triplets de primaires RVB et CMJ.

A l'aide de ce diagramme, on peut déterminer graphiquement le résultat du mélange (par synthèse additive) entre 2 couleurs, celui-ci se situe sur la ligne reliant les 2 couleurs de départ.

La figure suivante présente, avec plus de détails le contenu du diagramme xy.

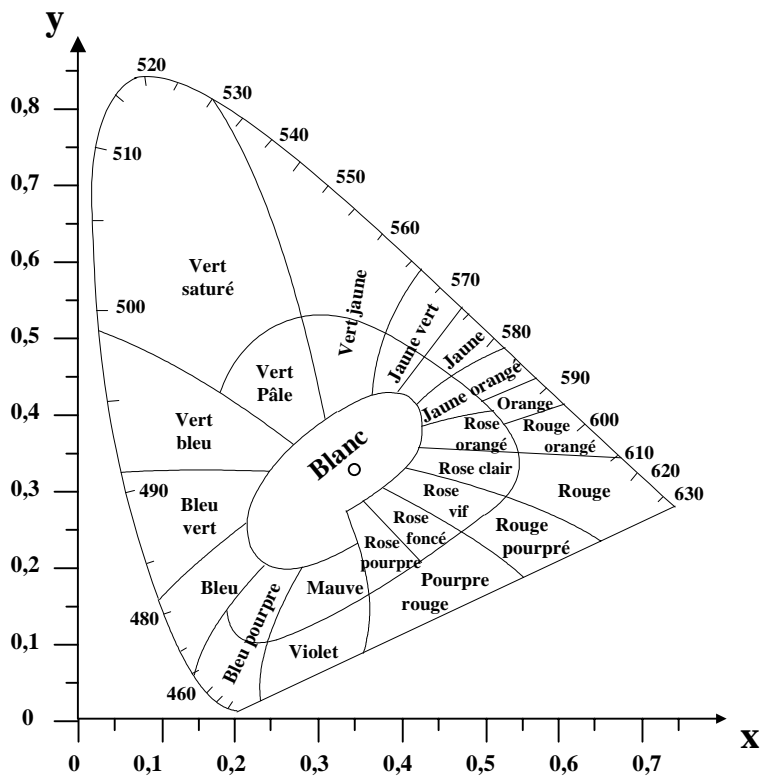


Fig. 4.7 : Construction du diagramme xy de la CIE (1931)

4.1.4 Perception visuelle des couleurs

L'œil possède une vision trichrome mais le cerveau interprète l'image reçue sous forme composée (Luminance - Chrominance) ; la chrominance correspond au complément d'information à fournir pour passer d'une image monochrome (issue de la luminance) à une image couleur

Il devient alors intéressant de passer d'un espace à 3 dimensions (RVB) à un espace à 2 dimensions (Y-C).

La luminance est majoritairement obtenue à partir du VERT ; la chrominance est obtenue par différence entre la luminance et les composantes ROUGE et BLEU :

$$Y = 0,30R' + 0,59V' + 0,11B'$$

$$C_B = \alpha(B' - Y)$$

$$C_R = \beta(R' - Y)$$

Dans des images naturelles, il y a une très forte corrélation entre les primaires R, V et B ; de ce fait, la Chrominance véhicule beaucoup moins d'information utile.

Les couleurs réelles n'occupent qu'une portion de la dynamique totale de l'espace Y-C ; la figure suivante présente le cube occupé par les couleurs visibles.

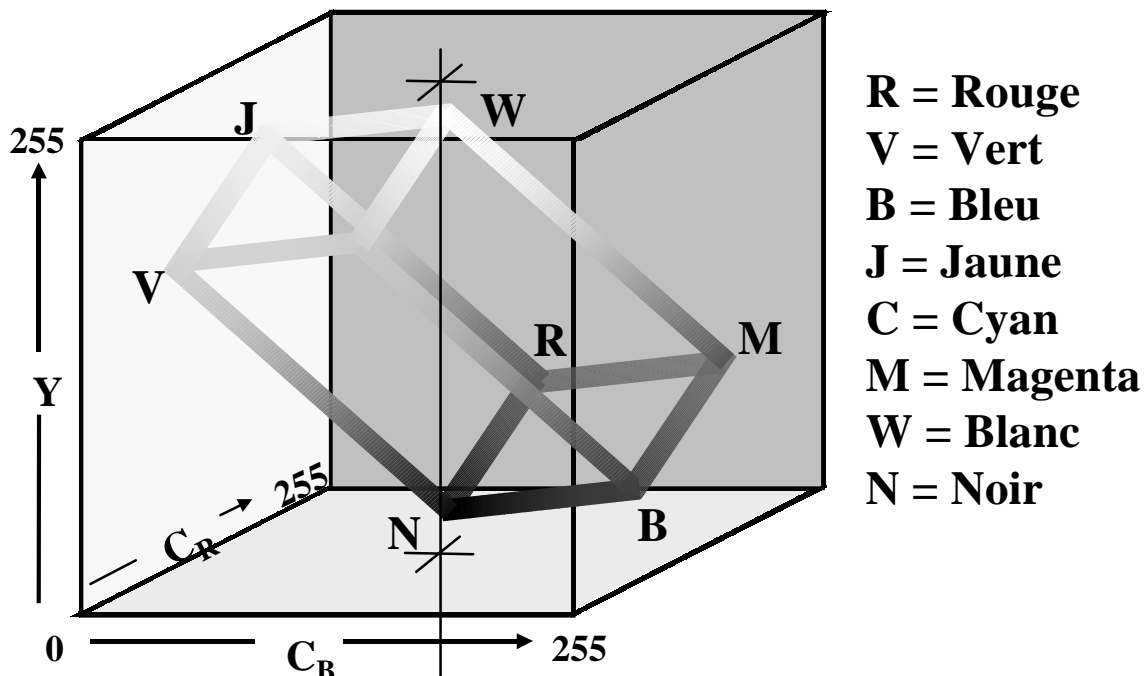


Fig. 4.8 : Cube des couleurs

4.2 Comportement de l'œil réel par rapport au système de la CIE

Le système trichromatique linéaire de la CIE résulte de la recherche d'un compromis entre la simplicité mathématique et la complexité réelle de la vision. Il est donc normal qu'il existe des écarts sensibles, rendus détectables par le fait même de l'existence d'un système de référence ; quelques écarts sont caractéristiques.

La reconnaissance des couleurs, de la manière qui est considérée comme habituelle par la grande majorité des spectateurs, a conduit à la représentation simplifiée des propriétés colorimétriques de l'œil moyen et à la colorimétrie classique.

Par rapport à cette représentation normalisée, on peut étudier les divers comportements de l'œil qui se classent en 2 catégories.

- Les écarts naturels qui ne constituent pas des anomalies de la vision mais des comportements particuliers propres à tous les yeux et qui s'écartent des résultats de la théorie linéaire ; par exemple :

- 1) il y a un écart entre la luminance objective d'une source et la clarté psychométrique, qui l'impression de luminosité donnée par l'œil ; à luminance objective constante, la clarté subjective varie un peu avec la couleur.

Le diagramme XYZ de la CIE étant en fait déduit de mesures faites sur des couleurs spectrales ou très saturées, les écarts sont plus importants pour des couleurs peu saturées et blanches, lesquelles apparaissent plus lumineuses qu'elles ne devraient l'être objectivement ; cet écart est particulièrement important pour les blancs bleutés.

- 2) La reconnaissance des couleurs dépend, pour certaines, de la luminance ; ainsi, la teinte chocolat n'est pas objective car, à forte luminance, cette couleur est un rouge normal.

- Les écarts particuliers correspondent à des anomalies très importantes par rapport à la colorimétrie. Certains sont naturels et valables pour tous les yeux ; c'est ainsi que la rétine perd progressivement la reconnaissance de certaines couleurs en vision latérales d'excentricité croissante.

Le vert et le rouge s'estompent les premiers à partir d'une excentricité de 20° environ ; le bleu et le jaune s'estompent à partir de 40° environ. En vision très latérale, la reconnaissance des teintes est très imprécise et l'image est reconnue par sa luminance, sensiblement en noir et blanc.

4.3 Acuité visuelle en chrominance

4.3.1 Réponse spatiale chrominance

La réponse spatiale de l'œil sur mire de luminance sinusoïdale ou sur mire de Foucault a conduit à la réponse d'ouverture représentée par la figure 3.5 qui sera reprise en synthèse de l'analyse de la vision des structures récurrentes fines.

La reconnaissance des teintes conduit à une analyse similaire, dans laquelle l'optotype est une mire de traits à 2 couleurs C_1 et C_2 , alternées et de même luminance. L'acuité visuelle aux couleurs

consiste à reconnaître la différence entre ces 2 couleurs, dans des conditions d'expérience qui mettent en jeu :

- la paire de couleurs $C_1 C_2$,
- la luminance de ces bandes,
- la fréquence spatiale ou l'acuité visuelle correspondant à la vision de cette fréquence spatiale.

Quelques résultats expérimentaux sont significatifs.

4.3.2 Mire à évolution chromatique sinusoidale autour du blanc

Dans cet essai, la variation de teinte est sinusoidale dans le plan xy le long d'un segment de droite, centré sur le blanc (W) ayant pour limites les points C_1 et C_2 . Le segment correspond à une certaine dominante (figure 4.9).

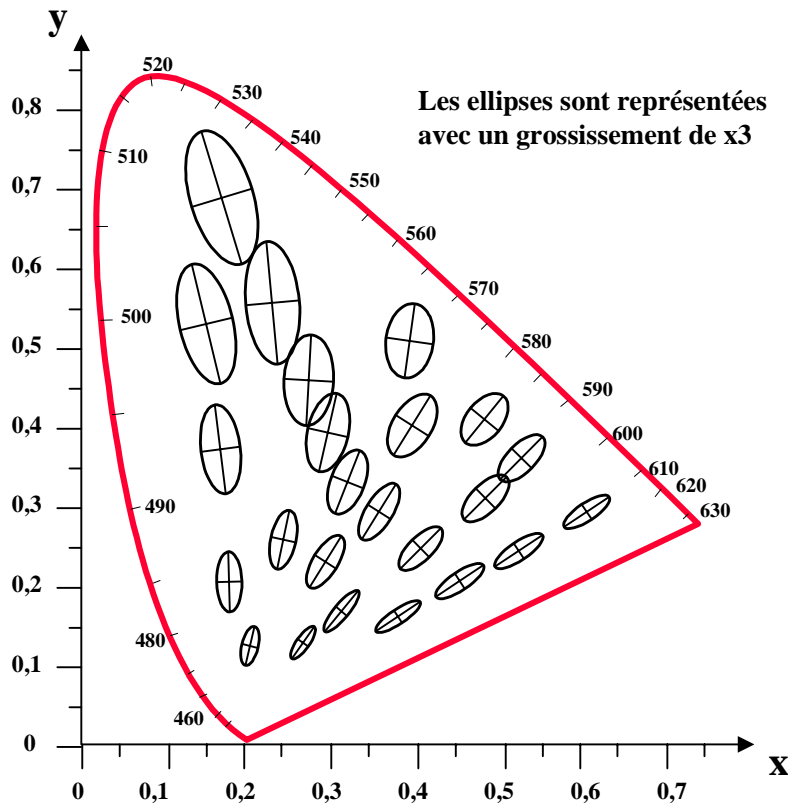


Fig. 4.9 : Essai de détermination des seuils chromatiques

L'essai consiste, pour une fréquence spatiale donnée, d'apprécier la limite de longueur maximale du segment $C_1 C_2$ en dessous de laquelle les 2 teintes ne sont plus discernables.

Le maximum de sensibilité, c'est à dire le minimum de longueur du segment $C_1 C_2$, s'avère voisin de $f_V = 0,6$ à $0,8$ $Cy/^\circ$ (Cycles/degré) ; cette valeur est à comparer au maximum de sensibilité pour la luminance qui se situe environ à 3 $Cy/^\circ$.

On a constaté une diminution de la sensibilité pour les fréquences visuelles plus faibles, de même que pour la luminance. La reconnaissance de la différence de teinte est meilleure lorsque les échantillons de teintes sont placés près les uns des autres.

Aux fréquences élevées, la sensibilité diminue ; tout se passe comme si l'ellipse augmentait de dimensions. Cette ellipse conserve un minimum (petit axe) orienté pourpre-rouge-vert ($\lambda = 495 \text{ nm}$) et un maximum orienté jaune-bleu ($\lambda = 567 \text{ à } 465 \text{ nm}$). La différence de sensibilité entre ces 2 directions est de l'ordre de 10 dB.

La sensibilité moyenne varie rapidement avec f_V et diminue de 20 à 30 dB pour $f_V = 10 \text{ Cy}^\circ$ pour une luminance moyenne ($\sim 25 \text{ cd/m}^2$) ; on constate que cet effet est plus rapide que pour la luminance.

L'effet de confusion des teintes pour les très petites plages se manifeste donc progressivement et, dans le diagramme xy à l'intérieur des ellipses de confusion, les teintes s'identifient à la teinte centrale. La fréquence de coupure peut s'assimiler à l'augmentation de la surface de confusion jusqu'à couvrir tout le diagramme, annulant toute reconnaissance de teintes différentes et ne conservant que la notion de luminance.

La sensibilité au contraste de teinte varie, également avec la luminance moyenne ; elle décroît lorsque la luminance diminue.

4.3.3 Contrastes associés de luminance et de teinte

Les images réelles associent généralement aux transitions une variation de luminance et une variation de teinte ; l'appréciation de dégradation de la transition peut provenir :

- soit d'un flou de luminance,
- soit d'une zone visible de transition des teintes (flou de teinte).

La comparaison des sensibilités à la luminance et à la teinte montre un décalage très important (dans un rapport 3 à 4) en fréquence.

En terme de durée d'établissement du signal, lors d'une transition, la même impression de finesse serait obtenue avec une durée plus grande pour la teinte que pour la luminance ; ce rapport dépend du couple de teintes en cause.

Lorsque la transition de luminance est associée à la transition de chrominance, un effet de masque se produit ; la finesse due au contraste de luminance masque l'effet de la teinte et, pour un contraste de luminance donné, la durée d'établissement de la variation de teinte peut être plus grande que celle correspondant à un contraste de luminance nul ; la figure 4.10 donne une interprétation moyenne de résultats d'essais. Pour un contraste de luminance CL donné à la transition, la durée d'établissement de la teinte d_T au moment où cette durée devient le critère reconnu de la dégradation de la transition.

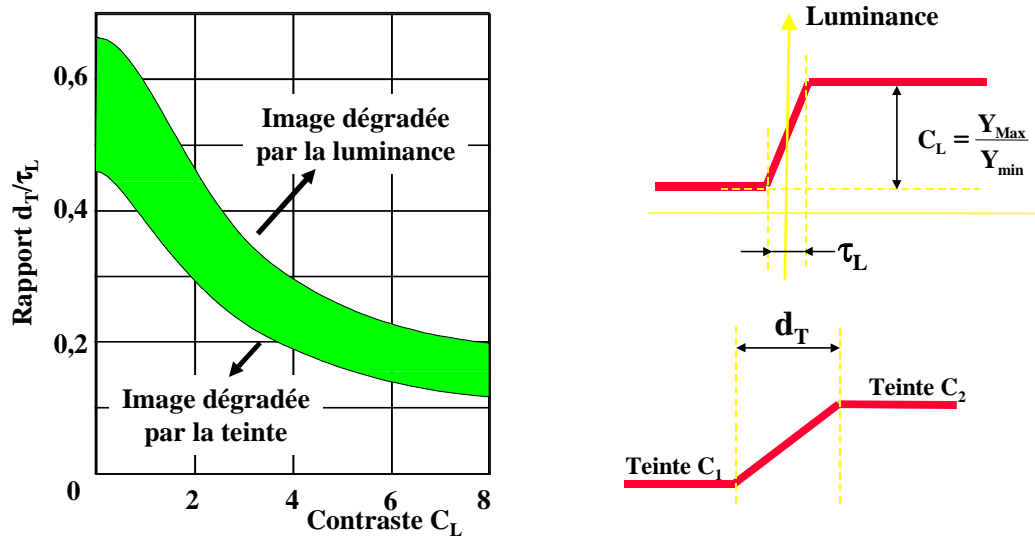


Fig. 4.10 : Effet de masquage de la transition de teinte par le contraste de luminance

4.4 Fusion des lumières périodiques, PAPILOTEMENT

4.4.1 Le papillotement ; fréquence critique

Lorsque l'éclairement de la rétine est variable dans le temps d'une manière lente, la sensation suit ces variations et l'observateur constate la variation.

Lorsque la fréquence des variations périodiques de l'éclairement croît, l'œil commence par ne plus apprécier la loi exacte de la variation du fait de ses réactions d'inertie, mais l'observateur ressent la variation de la lumière par l'impression de papillotement.

Lorsque la fréquence augmente encore, le papillotement disparaît et l'impression lumineuse devient une impression continue. La fréquence pour laquelle disparaît le papillotement est la fréquence critique : f_C .

Au-delà de la fréquence critique, l'impression lumineuse est équivalente à celle d'un éclairement constant dont la valeur serait la valeur moyenne de l'éclairement variable réel (loi de *Talbot*).

4.4.2 Principaux facteurs influençant le papillotement

L'étude de la fréquence critique montre que cette fréquence dépend de plusieurs facteurs :

1°) La loi de variation de l'éclairement périodique

Deux cas particuliers sont intéressants pour la technique des images :

- la variation sensiblement trapézoïdale des obturateurs des projecteurs de cinéma, avec passage au noir pendant $\sim 30\%$ de la période,

- la variation semi-exponentielle caractéristique de l'extinction des luminophores des tubes de télévision.

2°) La luminance

L'action de la luminance est importante car la fréquence critique augmente de manière logarithmique avec la luminance. Les mesures effectuées sur des images de cinéma ont conduit à la relation dite loi de *Ferry-Porter* :

$$f_C = 30,2 + 12,6 \cdot \log_{10} Y \quad (Y \text{ en } \text{cd}/\text{m}^2)$$

Les mesures faites en télévision montrent que la fréquence critique augmente lorsque la constante de temps de décroissance de la lumière du luminophore diminue. Les durées normales de décroissance des luminophores des récepteurs de télévision en noir et blanc sont de l'ordre de 3 à 5 ms. La figure 4.11 donne la limite approximative du papillotement pour le cinéma et la télévision ; on notera que les fréquences de trame de 50 Hz en Europe et 60 Hz aux Etats-Unis correspondent à des luminances limites sensiblement différentes, à l'avantage du 60 Hz.

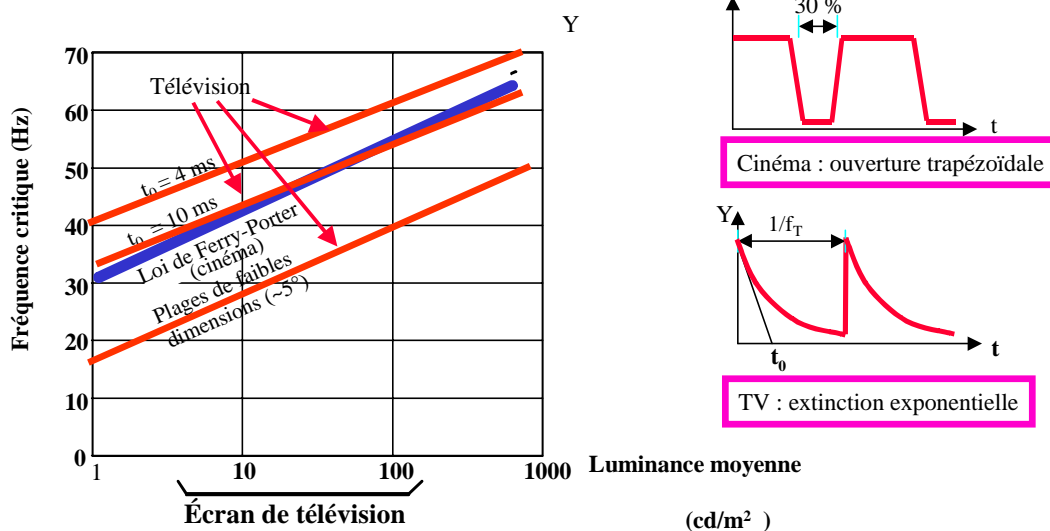


Fig. 4.11 : Fréquence critique de papillotement

3°) Dimension de la surface

La fréquence critique f_C augmente lorsque la dimension de la surface de test, à lumière variable, augmente ; à luminance égale, les plages de faibles dimensions cessent de papilloter pour des fréquences plus faibles que les plages de grandes dimensions. Par exemple, une plage vue sous un angle de 5° , dont la luminance moyenne est de $1000 \text{ cd}/\text{m}^2$ a une fréquence critique de l'ordre de 45 Hz alors que cette fréquence est de l'ordre de 50 à 60 Hz pour des images vues sous un angle assez grand et de luminance uniforme.

Cette particularité constitue un avantage pour la télévision lorsque les images réelles sont constituées de plages de forte luminance de relativement petites. La fréquence critique correspond sensiblement à la luminance moyenne de l'image et non à sa luminance crête.

4°) Excentricité de la vision

Le papillotement en vision latérale suit des lois complexes : aux luminances élevées, l'excentricité tend à diminuer la fréquence critique, par contre, aux luminances faibles, c'est le contraire, la fréquence critique augmente et telle image qui ne papillote pas en vision centrale, papillote en vision latérale, ce que l'on constate souvent en télévision.

4.5 Papillotement localisé de luminance

Dans une image globalement stable, une petite surface test peut être soumise à une variation de luminance périodique.

Une situation type de structure visuelle est constituée par l'image d'une mire électronique à structure spatiale sinusoïdale qui peut être soumise à une modulation temporelle sinusoïdale de sa luminance ; la figure 4.5 montre la composition de cette mire avec ses paramètres

- la luminance moyenne L_0
- le contraste de modulation $C = \Delta L/L_0$
- la fréquence spatiale visuelle f_V (en $Cy/^\circ$)
- la fréquence de modulation de luminance f_m (en Hz)

Cette mire, utilisée sans modulation de luminance, permet de déterminer le contraste liminal C de reconnaissance de la structure en fonction de f_V .

Pour une structure fixe, correspondant à f_V , la modulation de luminance provoque un papillotement dont la visibilité associe les valeurs C et f_m ; pour C donné, le papillotement disparaît si $f_m > f_0$ (f_0 : fréquence limite de fusion).

Cette disparition du papillotement est une réaction rétinienne de réponse nulle équivalente à une réponse amplitude-fréquence. Elle correspond dans le temps à l'effet d'annulation de la réponse spatiale à la variation de luminance et ce test est aussi utilisable pour apprécier les seuils de détection des écarts de luminance.

La figure 4.12 montre le résultat obtenu pour les luminances moyennes de la télévision ; le couple $C - f_m$ est fonction de la fréquence spatiale visuelle.

On constate que la réponse correspond à un filtrage passe-bas à variation rapide de la réponse au voisinage de la fréquence de coupure.

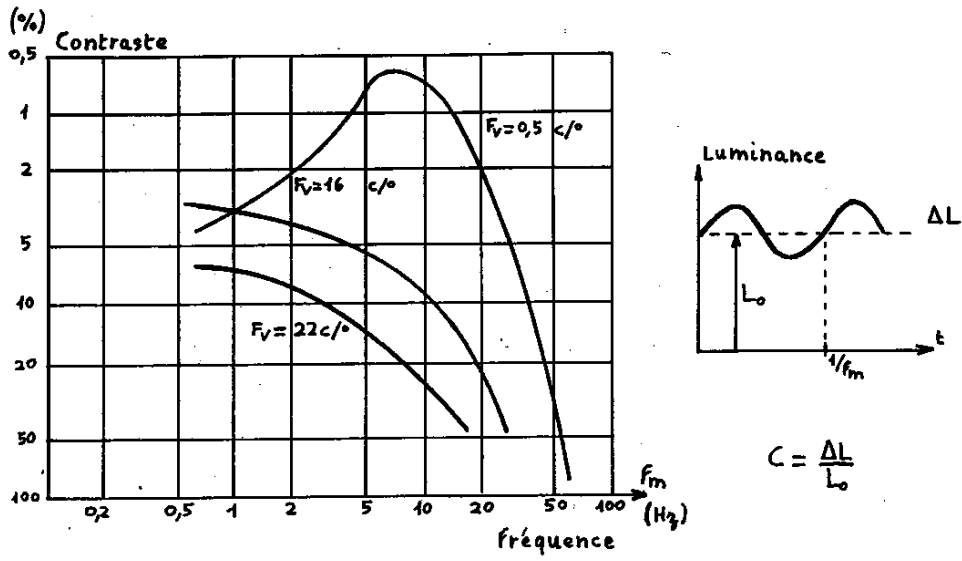


Fig. 4.12 : Relation Contraste - fréquence de modulation

5 CHOIX DE LA FRÉQUENCE TRAME OU IMAGE

La restitution des images, que ce soit pour le cinéma ou la télévision, se fait par échantillonnage temporel de la scène analysée ; c'est à dire que l'on visualise des images ou des trames (qui sont des portions d'images) cadencées à une certaine fréquence dont le choix résulte d'un compromis entre plusieurs facteurs :

5.1 Restitution du mouvement

La restitution du mouvement demande une fréquence minimale de l'ordre de 12 à 15 échantillons par seconde afin d'éviter tout effet stroboscopique lors de mouvements rapides. Une image de qualité correcte nécessite une fréquence de 24 à 25 échantillons par seconde (cas du cinéma) mais certains essais tendraient à souhaiter une fréquence de l'ordre de 70 éch./s afin d'obtenir une restitution irréprochable. Dans le cas de la télévision, la fréquence d'échantillonnage étant la fréquence de trame (50 Hz), la restitution des mouvements est considérée comme étant de bonne qualité.

5.2 Contraintes dues au tube image

Les tubes images actuels, à luminescence, ont une réponse lumineuse à extinction exponentielle et la lumière émise est pulsée ; il en résulte un effet de papillotement. Sur les récepteurs actuels, une valeur de 100 cd/m^2 pour la luminance moyenne est usuelle et correspond à une fréquence critique pour la disparition du papillotement de 50 Hz ; on se situe donc à la limite d'acceptation de ce défaut. La tendance actuelle étant à l'agrandissement des dimensions des écrans TV (donc l'accroissement de l'angle de vision) et à l'augmentation de la luminance moyenne, la fréquence critique devient de l'ordre de 70 Hz (fréquence choisie pour les écrans graphiques d'ordinateurs). Le cas de la vision latérale est encore plus critique.

5.3 Contraintes dues au secteur

La réalisation des appareils électroniques d'analyse et de synthèse et, tout spécialement, la réalisation économique des récepteurs domestiques conduit à prendre en considération 2 types de défauts dus au fait que le circuit d'énergie pour l'alimentation est le secteur normal alternatif à 50 ou 60 Hz suivant les pays.

- a) Le résidu de ronflement du secteur sur les tensions de polarisation module les amplificateurs et transmet dans le signal image un signal parasite pour la luminance à la fréquence du secteur. La visibilité de cette modulation parasite dépend considérablement de la différence entre la fréquence trame et la fréquence secteur ; la protection doit être particulièrement importante lorsque cette différence est de l'ordre de 7 à 10 Hz.
- b) le rayonnement magnétique du transformateur d'alimentation peut influencer de faisceau électronique du tube image et causer une distorsion de géométrie de l'image ; dans ce cas aussi, cette distorsion est peu visible si fixe ou quasi-statique, ce qui correspond à une

différence de fréquence nulle ou très faible, mais devient très visible si la différence de fréquence rend mobile ce défaut de géométrie.

En conséquence, pour faciliter la fabrication des récepteurs domestiques, il y a grand intérêt à donner à la fréquence de trame une valeur égale, ou du moins très voisine de celle du secteur l'alimentation du récepteur. Notons que la fréquence de trame est fixée dans le centre de production de l'image, studio ou car de reportage et qu'il est parfois facile de se synchroniser sur le secteur qui est lui-même synchronisé au niveau d'un pays ou même d'un continent.

Le problème se pose en télévision couleur où la stabilité de la fréquence de trame impose l'indépendance vis-à-vis du secteur ; il faut toutefois noter que l'écart reste très faible.

En conséquence, la fréquence nominale de trame a été prise égale à celle du secteur d'énergie, à savoir 50 Hz en Europe (60 Hz aux États-Unis). Cette considération entraîne malheureusement la division du monde en 2 groupes. La télévision subit indirectement et avec des conséquences graves pour les échanges de programmes à l'échelle mondiale, l'absence d'entente internationale des électriciens sur le problème de la fréquence d'énergie.

Remarque :

La fréquence 50 Hz est à la limite du papillotement des images alors que la fréquence 60 Hz est nettement supérieure en ce domaine : elle autorise des luminances plus élevées et donne à l'image une impression de stabilité supérieure à celle qui se base sur le 50 Hz. En contre partie, pour une finesse donnée de l'image, la bande vidéo-fréquence est proportionnelle à la fréquence de trame, ce qui donne l'avantage aux fréquences faibles.