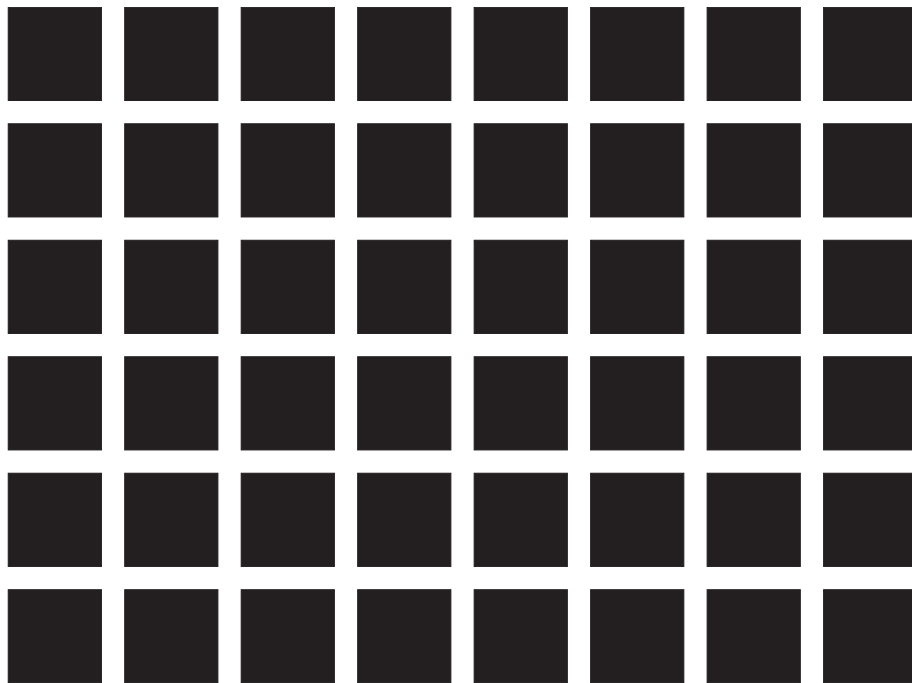


Sensibilité au contraste Perception spatiale et temporelle



5 décembre 2016

Patrick FERRAND, maître de conférences HdR à l'université d'Aix-Marseille
Institut Fresnel, Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille
Domaine universitaire de St Jérôme, 13397 Marseille cedex 20
www.fresnel.fr/perso/pferrand



Illustration de couverture. Illusion de la grille de Hermann. Le motif contrasté donne l'impression de la présence de tâches grises aux intersections des lignes blanches. Cet effet est dû au codage spécifique du contraste spatial qui s'opère au niveau de la rétine. On remarquera que l'effet dépend de la zone fixée, et de la distance d'observation. Pour en savoir plus, rendez-vous au chapitre 1.

Avertissement. Ce document est extrait de mes notes de cours (mes excuses pour les nombreuses fautes de frappe et d'orthographe présentes). Il a pour vocation de compléter mais pas de remplacer pas les notes que vous avez pu prendre en cours.

Table des matières

1	Acuité visuelle, sensibilité au contraste spatial	7
1.1	Acuité visuelle	7
1.1.1	Définition historique	7
1.1.2	Acuité de reconnaissance	8
1.1.3	Disgression : l'acuité de détection	9
1.1.4	Influence du diamètre pupillaire	10
1.1.5	Autres facteurs influant sur l'acuité visuelle	11
1.2	Rôle du contraste	13
1.2.1	Effet de contraste simultané	13
1.2.2	Définition du contraste	14
1.2.3	Les réseaux spatiaux	14
1.3	Résolution dans le domaine fréquentiel spatial	15
1.3.1	Mesure de la sensibilité au contraste	15
1.3.2	Courbes de sensibilité au contraste	17
1.4	Le modèle des champs récepteurs	18
1.4.1	Structure de la rétine	18
1.4.2	Mise en évidence des champs récepteurs	19
1.4.3	Rôle des champs récepteurs pour la sensibilité au contraste	20
1.5	Le modèle des canaux spatiaux	22
1.5.1	Description	22
1.5.2	Expériences de mise en évidence	23
1.6	Acuité au seuil de détection	24
1.7	Conclusion	25
2	Sensibilité temporelle	27
2.1	Luminosité des lumières brèves, loi de Bloch	27
2.2	Sensibilité au contraste temporel	27
2.3	Interprétation	29
3	Sensibilité spatio-temporelle	31
3.1	Sensibilité au mouvement	31
3.1.1	Etude du seuil de vitesse v_{min}	31
3.1.2	Etude du déplacement absolu a_{lim}	32
3.2	Réseaux papillotants	32
3.2.1	Réalisation d'un réseau papillotant	32
3.2.2	Expérience et résultats	33
3.3	Réseaux défilants	35
3.3.1	Réalisation d'un réseau défilant, lien avec un réseau modulé dans le temps	35

TABLE DES MATIÈRES

3.3.2	Expériences et résultats	36
4	L'espace visuel	39
4.1	Le champ visuel d'un point de vue géométrique	39
4.1.1	Quelques notions et définitions	39
4.1.2	Les coordonnées géométriques du champ visuel	39
4.2	Le processus de fusion	41
4.2.1	Définition des points correspondants	41
4.2.2	Expérience-type de mise en évidence de la fusion	41
4.2.3	L'horoptère	42
4.2.4	Diplopie et aire de Panum	43
4.3	Vision du relief, appréciation des distances	44
4.3.1	Aspect qualitatif : une perception de profondeur relative	44
4.3.2	La stéréopsie : un module indépendant de perception	44
4.4	Aspect quantitatif	46
4.4.1	Parallaxe stéréoscopique	46
4.4.2	Le cinéma en 3D	47
4.4.3	Acuité stéréoscopique	47
4.4.4	Théories de l'acuité stéréoscopique	47
4.4.5	Seuil de vision binoculaire	48
4.5	Relief monoculaire	48
4.5.1	La parallaxe monoculaire	48
4.5.2	L'accommodation	49
4.5.3	Autres facteurs	50
4.5.4	Principe de non-contradiction	50
	Bibliographie	51
	Index	52

Introduction

La vision

La perception visuelle est l'ensemble des sensations produites par des stimuli lumineux reçus par l'œil. Elle implique un grand nombre de processus complexes, partant d'une distribution spatiale et temporelle de la lumière sur la rétine et aboutissant à une perception de notre environnement. Précisons la chaîne de mécanismes mis en jeu à tous les niveaux, ainsi que les disciplines scientifiques concernées :

1. Illumination de la rétine par une distribution spatiale, temporelle et spectrale d'intensité lumineuse. Il s'agit de notions d'optique géométrique, d'optique physique, et d'optique physiologiques. Ces théories ont été établies au cours du XIXe siècle.
2. Stimulation des photorécepteurs. La discipline concernée ici est l'interaction lumière-matière, qui repose sur les théories de mécanique quantique, établie au début du XXe siècle.
3. Premiers traitement neuroniques au niveau de la rétine (neurophysiologie),
4. Traitements par le cortex cérébral (neurophysiologie),
5. Mise en relation des informations des différents sens, construction d'une représentation perceptive (psychologie cognitive)

Les derniers points de cette liste s'éloignent donc de la physique pour approcher les domaines de la biologie, de la neurophysiologie et de la psychologie. On progresse donc de disciplines anciennes, maîtrisées depuis quelques siècles, reposant sur des systèmes simples (physique), pour aboutir à des organismes vivants, puis à des individus.

Ce cours se situera entre les niveaux 2 et 3 : En se basant sur la description d'expériences scientifiques menées en laboratoires sans rapport direct avec le monde extérieur, on quantifiera les caractéristiques spatiales, temporelles des phénomènes qui peuvent être perçus, on décrira les processus qui permettent la vision.

Plan du cours

Le cours sera décomposé de la façon suivante :

1. Acuité visuelle, sensibilité au contraste spatial
2. Sensibilité temporelle
3. Sensibilité spatio-temporelle, perception du mouvement
4. Espace visuel, vision binoculaire

Les prérequis pour ce cours sont :

- Les notions d'optique de base : essentiellement la formation des images, et l'optique physique

TABLE DES MATIÈRES

- La connaissance de la structure de l'œil, du rôle des différents photorécepteurs (cônes, bâtonnets),
- Quelques notions de mathématiques : algèbre, trigonométrie.

Rappel : unités de mesure et échelles

Distances angulaires

En sciences de la vision, comme la taille apparente d'un détail d'une scène dépend de la distance d'observation, ces tailles sont traditionnellement données en valeur d'angle, en degrés ou minutes d'arc ($1' = 1/60 \text{ deg}$). Un objet de taille d , vu à une distance D , est vu sous un angle α tel que $\tan \alpha = d/D$. Dans le cas d'angles petits (inférieurs à quelques degrés), on montre que l'on peut faire l'approximation $\alpha \simeq d/D$, si l'on prend le soin d'exprimer α en radians.

Luminance

Pour quantifier la luminosité des scènes observées, nous utiliserons la grandeur appelée luminance, qui permet de quantifier la lumière reçue par unité de surface observée, et par unité d'angle solide. La luminance en photométrie¹ est exprimée en lumen par stéradian et par mètre carré ($\text{lm}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) ou en candela par mètre carré ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$).

Outre la luminance de la scène, la quantité de lumière rentrant dans l'œil dépend également du diamètre pupillaire. On parle alors d'éclairement rétinien, que l'on exprime en troland (td), donné par le produit de la luminance (exprimé en cd/m^2) par la surface pupillaire (exprimée en mm^2). En pratique, la plupart des expériences présentées dans ce cours sont menées en plaçant devant l'œil du sujet une pupille artificielle, qui imposera la surface pupillaire, si bien que l'éclairement rétinien sera varié pendant l'expérience de la même façon que la luminance de la scène observée.

Echelles logarithmiques

Lorsque l'on souhaite représenter graphiquement des données numériques s'étendant sur plusieurs ordres de grandeur, il est judicieux

- soit de représenter le logarithme des données,
- soit d'utiliser une échelle logarithmique, ce qui est beaucoup plus lisible, puisque les véritables valeurs des grandeurs sont alors affichées sur l'axe.

La Fig. 1 illustre la différence entre des échelles linéaires et logarithmiques, pour des données étalées sur plusieurs décades (0,1 ; 0,2 ; 1 ; 2 ; 10 ; 20 ; 200 ; 2000). Comme on peut le voir, les valeurs représentées en échelle linéaires sont tassées sur la gauche. Il est donc judicieux de ne pas représenter la valeur x , mais sa valeur $\log(x)$, comme montré sur le graphe du milieu.

Pour ce faire, on se souvient que Sachant que $\log(1) = 0$, $\log(10) = 1$, $\log(2) = 0.3$, $\log(a^n) = n\log(a)$ et $\log(ab) = \log(a) + \log(b)$. Ainsi par exemple, $\log(0,2) = \log(2 \times 10^{-1}) = 0,3 - 1 = -0,7$.

La représentation la plus utilisée est celle présentée sur la graphe du bas. On place chaque valeur s suivant sa valeur sur une échelle logarithmique. Les logiciels de tracés de données disposent d'options pour effectuer cela simplement.

1. Il existe une grandeur du même nom utilisée en radiométrie, utilisant comme références des unités plus générales comme le nombre de photons et la fréquence en Hz de l'onde.

TABLE DES MATIÈRES

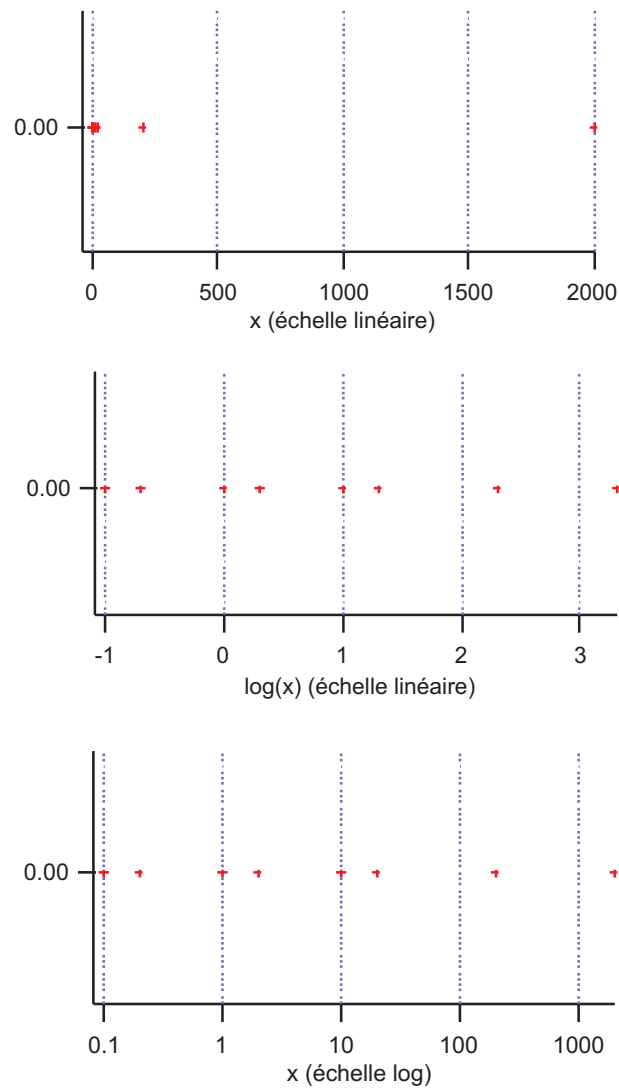


Figure 1 – Comparaison des représentations de valeurs de la grandeur x , e haut en bas, x en échelle linéaire, $\log(x)$ en échelle linéaire, et x en échelle logarithmique.

Alors qu'il est impossible de distinguer les valeurs des premières données sur le tracé linéaire, le tracé logarithmique permet de distinguer des valeurs même si celles-ci recouvrent une grande dynamique. En outre, on remarque que l'écart de positions entre deux valeur renseigne sur le facteur qu'il y a entre ces valeurs (autant d'écart entre 0,1 et 1 qu'entre 20 et 200). Ceci est à comparer avec une échelle linéaire pour laquelle un écart correspond à une différence entre deux valeurs.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1

Acuité visuelle, sensibilité au contraste spatial

On se propose de déterminer quels sont les plus petits détails que l'œil peut percevoir. On décrira notamment comment mesurer ces performances limites, et quels sont les paramètres qui les influencent.

Dans tout ce chapitre, les hypothèses sont :

- que du noir, du blanc, et du gris, pas de couleur,
- un seul œil, emmétrope, focalisé,
- phénomènes statiques

Dans ce premier chapitre, nous détaillerons ce qui est généralement regroupé sous la notion d'acuité visuelle. Nous distinguerons les différents types d'acuités visuelles, et nous insisterons particulièrement sur le rôle joué par le contraste. Cela nous amènera à définir la résolution dans le domaine spatial fréquentiel. Nous verrons comment la connaissance actuelle de l'architecture rétinienne permet de comprendre l'efficacité du système visuel.

1.1 Acuité visuelle

1.1.1 Définition historique

C'est Hooke (1635-1703) qui a introduit la notion d'*acuité visuelle* comme le pouvoir de distinguer avec un seul œil deux étoiles rapprochées. Dans la mesure où la taille apparente de l'objet dépend de la distance à l'observateur, on préfère parler de l'*angle apparent* de la distance limite détectable à l'œil.

Par définition, l'*acuité visuelle* (AV), exprimée en min^{-1} , est l'inverse de l'écart angulaire α_{\min} entre deux points tout juste séparables :

$$AV = \frac{1}{\alpha_{\min}}$$

Une acuité de 1 (ou 10/10) correspond donc à un angle d'une minute d'arc¹. Il s'agit d'un bon ordre de grandeur de l'acuité de l'œil d'un sujet jeune et emmétrope.

Cette acuité, que l'on qualifie d'acuité de *résolution*, repose sur une définition mathématique relativement simple. En revanche, elle correspond à des situations d'observation (distinguer

1. A titre indicatif, la distance sur la rétine est alors de l'ordre de $5 \mu\text{m}$.

des étoiles...) bien éloignées des conditions courantes de vision. Aussi, lorsqu'il s'agit de quantifier la vision, dans les conditions proches des usages quotidiens, on lui préfère l'acuité dite de reconnaissance que nous décrivons dans la section suivante.

1.1.2 Acuité de reconnaissance

Ne reposant pas sur une définition aussi rigoureuse que l'acuité de résolution, l'acuité de reconnaissance est *évaluée* au moyen d'optotypes.

De nombreuses méthodes de mesures ont été mises au point. Elles présentent toutes l'avantage d'un examen clinique relativement rapide, qui permet de déceler facilement les principales pathologies, et de les corriger le cas échéant.

Ils s'agit principalement de formes géométriques, ou de lettres à reconnaître. Les objets sont noirs sur un fond clair très lumineux, et placés à une distance réglementaire.

Mesure de l'acuité

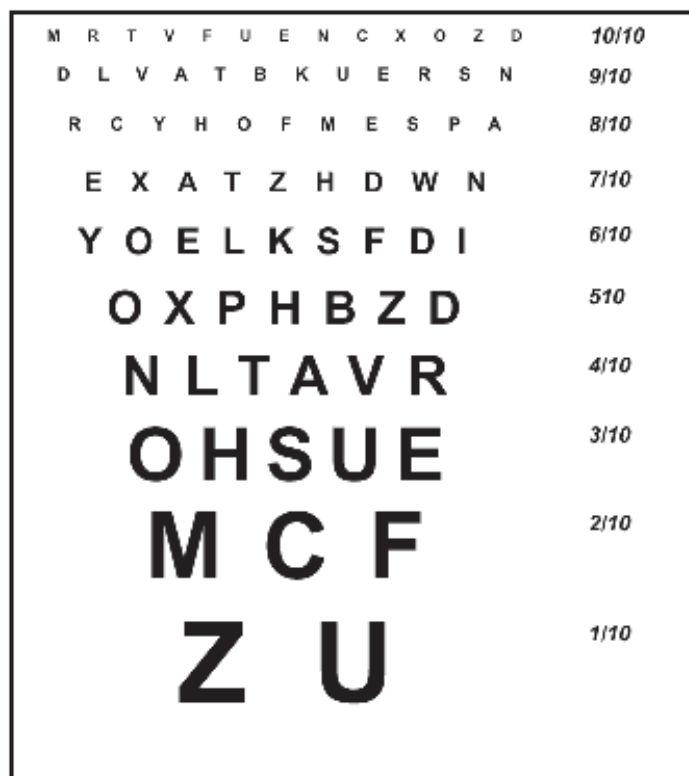


Figure 1.1 – Optotype de Monoyer.

Les premiers optotypes ont été proposés par Snellen vers 1861. Snellen proposa des lettres dont la taille fait 5' pour un patient à la vue normale (a.v. 1). L'épaisseur du trait est 1/5 de la taille de la lettre. Certaines lettres (I, J, Q, W, X) sont rapidement identifiées comme trop aisées à reconnaître et sont éliminées. Les plus jeunes patients obtiennent souvent une acuité supérieure à 1. Concernant les progressions de taille, on utilise en France depuis 1875 l'échelle de Monoyer, illustrée sur la Fig. 1.1. Elle présente

cependant l'inconvient de privilégier les bonnes acuités à cause de sa progression discontinue du nombre de lettres sur chaque ligne.

Il est évident que l'usage des lettres, s'il est très répandu parce que pratique, n'est fiable pour des mesures occasionnelles car la déduction joue un rôle important dans la détection. Nous verrons dans la suite de ce chapitre que les études systématiques scientifiques utilisent d'autres motifs à identifier.

1.1.3 Disgression : l'acuité de détection

Finissons la revue des acuités en se demandant (ce pourrait être la question posée par un enfant) quelle est notre capacité à voir de petits objets. On pourrait alors parler d'acuité de détection, même si nous allons voir que cette grandeur n'est finalement pas très pertinente.

Détection d'objets brillants sur fond sombre

Il s'agit du premier cas qui vient à l'esprit. Cette situation intervient par exemple lors de l'observation d'une étoile dans le ciel nocturne. Quelle doit être la taille angulaire de l'étoile pour qu'elle soit visible ?

En réalité, cette question n'a pas de sens. En effet, en dessous d'une certaine taille angulaire, l'image va être affectée par la limite de diffraction², les aberrations³. Ainsi, la taille de l'image ne dépendra pas de l'objet considéré, mais simplement du système optique d'observation. En astronomie, toutes les images d'étoiles (excepté le soleil) ont la même taille.

On se souvient qu'une ouverture de diamètre D diffracte la lumière avec un angle de l'ordre de $\theta \simeq \lambda/d$, où λ est la longueur d'onde ($0.4 - 0.7 \mu\text{m}$). Pour $D = 3 \text{ mm}$, on a donc $\theta = 0.5/3000 = 1.6 \cdot 10^{-4}$, soit une taille de tâche d'approximativement $3 \mu\text{m}$, si l'on suppose que la distance pupille - rétine est de 20 mm.

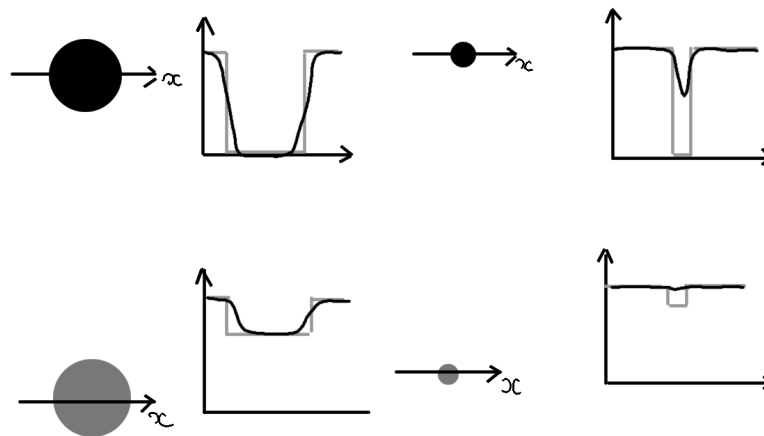
Ainsi, ce qui va déterminer qu'un objet lumineux sera détectable, ce n'est pas sa taille apparente, mais sa luminosité. Ceci explique pourquoi la question de la taille minimal n'a pas d'intérêt. En astronomie, les étoiles sont caractérisées par leur magnitude (grandeur tirée de la luminosité). C'est celle-ci qui détermine si l'étoile sera visible à l'œil nu, et celle-ci que l'on améliore en observant les astres au moyen de télescopes.

Détection d'objets sombres sur fond clair

Dans ce cas, la situation est différente. On peut voir un objet sombre sur fond clair comme une succession d'objets ponctuels lumineux (le fond clair), sauf à l'endroit de l'objet. Les zones lumineuses de la scène vont avoir comme image une superposition de tâches de diffraction qui vont donner une image homogène. En revanche, en bordure de zone illuminée, on retrouvera les contours des tâches de diffraction, comme illustré sur la figure ci-dessous. Au final, l'image aura donc des transitions de luminances moins marquées.

2. Une lentille a toujours une taille finie. Dans ces conditions, d'un point, elle donnera une image dont l'étendue latérale sera l'effet de la diffraction dans son ouverture.

3. On peut avoir des aberrations chromatiques, car la focale du système visuel dépend de la longueur d'onde considérée, mais aussi des aberrations de sphéricité, car la courbure sphérique ne permet pas la convergence des rayons d'un faisceau parallèle en un lieu unique.



L'objet sera invisible en deçà d'une certaine taille angulaire, cette dernière dépendant du contraste de la scène. Pour être distingué, un objet gris devra être plus gros qu'un objet noir. Ceci montre que le contraste joue un rôle important.

1.1.4 Influence du diamètre pupillaire

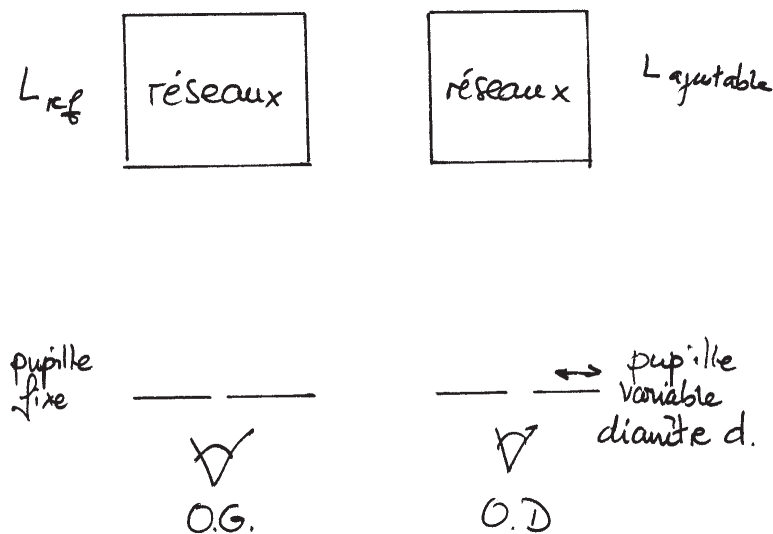


Figure 1.2 – Schéma de l'expérience d'Arnulf-Leibowitz.

En 1937, Arnulf a fait une série d'expériences pour mesurer quantitativement l'influence de la luminance sur l'acuité visuelle. En 1952, Leibowitz améliore le protocole pour isoler l'effet du diamètre pupillaire.

Le protocole est illustré sur la Fig. 1.2. Le sujet observe un ensemble de réseaux de différentes périodes, de contraste 1. Pour chaque luminance de référence et chaque diamètre pupillaire d , le sujet doit égaliser la brillance apparente du test perçue à travers la pupille artificielle à celle perçue par l'autre œil à travers une pupille fixe de petite dimension. De cette façon, même en modifiant le diamètre pupillaire, on est sûr que l'éclairement total

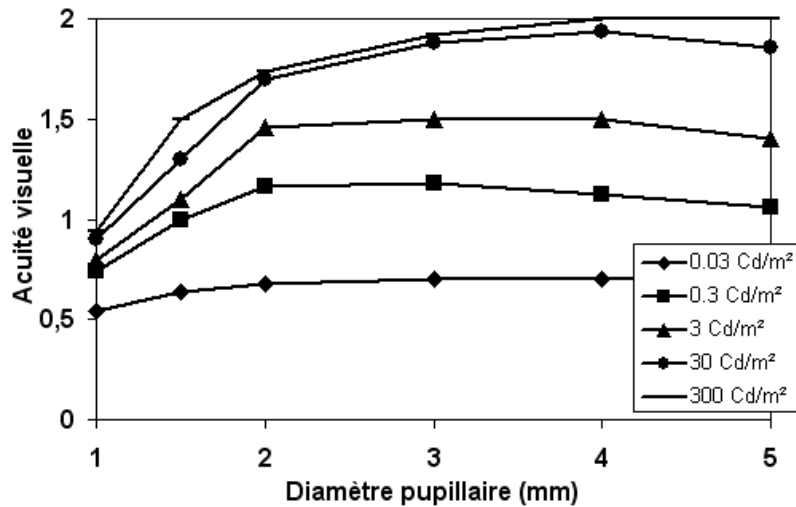


Figure 1.3 – Résultat de l'expérience d'Arnulf-Leibowitz.

sur la rétine sera le même pour toute la série de mesures. Les résultats de l'expérience, illustrés sur la Fig. 1.3, mettent en évidence que :

1. La diminution du diamètre pupillaire se traduit par une diminution de l'acuité ;
2. L'acuité est meilleure à forte luminance.

La dégradation est très sensible lorsque le diamètre est inférieur à 2 mm.

Remarque. Vous avez sans doute appris qu'un trou sténopéique placé devant l'œil permet d'améliorer l'acuité visuelle, en diminuant la "tâche de diffusion". Le résultat que nous venons de trouver peut vous paraître contradictoire. Il faut bien comprendre la finalité de chaque pratique. Le trou sténopéique est utilisé en cas de défaut d'accommodation (hypermétropie, myopie, etc.). Il permet de s'affranchir du défaut d'accommodation. Mais ces conditions ne permettent pas d'atteindre une très grande acuité. Essayez pour vous en convaincre de mesurer votre acuité visuelle en regardant à travers un trou sténopéique. En revanche, l'expérience d'Arnulf-Leibowitz, menée sur des sujets emmétropes montre qu'un diamètre pupillaire important, conjugué à une forte luminance, sont les meilleures conditions optiques pour atteindre l'acuité ultime.

1.1.5 Autres facteurs influant sur l'acuité visuelle

Dans tout ce qui suit, il est important d'insister sur le rôle joué par l'adaptation : l'acuité optimale ne peut être obtenue qu'après un temps d'exposition relativement long.

Les facteurs lumineux

Il y a de très nombreux facteurs qui influent sur l'acuité. Le but ici n'est pas d'être exhaustif mais de donner quelques exemples de ces facteurs.

Luminance du fond On considère un trait sombre traversant un fond lumineux. Une pupille artificielle est placée sur l'oeil : le diamètre pupillaire est donc fixé. On mesure alors (Fig.1.4) qu'une ligne fine est d'autant plus détectable que la luminance du fond est élevée (échelle log). Ainsi, *l'acuité augmente avec la luminance du fond*. Cette expérience permet aussi de mettre en évidence la dualité entre les cônes et les bâtonnets. La partie gauche de la courbe, correspond aux faibles luminances (bâtonnets pour la vision scotopique), alors que la partie droite correspond aux fortes luminances (cones pour la vision photopique).

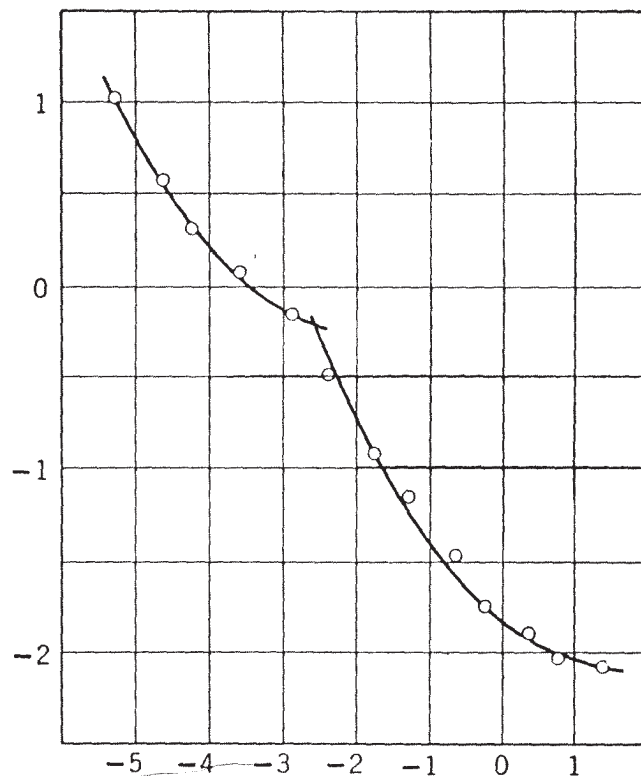


Figure 1.4 – Relation entre l'intensité du fond et l'angle sous lequel est vu un fil juste perceptible. Abscisse : Log de la luminance de fond (mL), ordonnée Log du diamètre apparent en minute d'arc. D'après Buser [Buser].

Excentricité En conditions photopiques, l'acuité chute lorsque l'excentricité augmente. Elle est constante en conditions scotopiques, avec un léger maximum vers 5 degrés, qui peut être mis en évidence lors de la détection nocturne d'étoiles de faible luminosité.

Couleur L'acuité visuelle a été définie jusqu'à présent sur fond blanc. En lumière monochromatique, elle est sensiblement la même. Cependant, la différenciation entre couleurs différentes mais de luminance proche (on peut imaginer un réseau de traits rouges et verts) est bien moins bonne. Ceci est dû au fait que l'analyse des couleurs se fait dans le cerveau (système peu résolvant) et non dans l'œil.

Cet effet est utilisé pour produire une impression visuelle de couleur uniforme au moyen de réseaux de traits ou de points (imprimerie, télévision, peinture, etc.)

Adaptation Les expériences présentées sont obtenues dans des conditions optimales pour l'adaptation. En effet, l'acuité visuelle est meilleure après une adaptation de quelques minutes en conditions photopiques.

1.2 Rôle du contraste

Nous venons de voir que la perception passe par la discrimination de stimulus de luminance différente présentés simultanément. Nous avons vu que les méthodes courantes de mesure de l'acuité visuelle sont limitées car peu précises. En outre, l'acuité est limitée par de nombreux facteurs, parmi lesquels le contraste de luminance. Nous allons maintenant voir comment les notions de contraste de fréquence spatiale permettent d'appréhender quantitativement le système visuel.

Pour illustrer la nécessité de considérer le contraste à part entière, nous décrivons quelques observations que l'on pourrait ranger dans le domaine des illusions d'optique.

1.2.1 Effet de contraste simultané

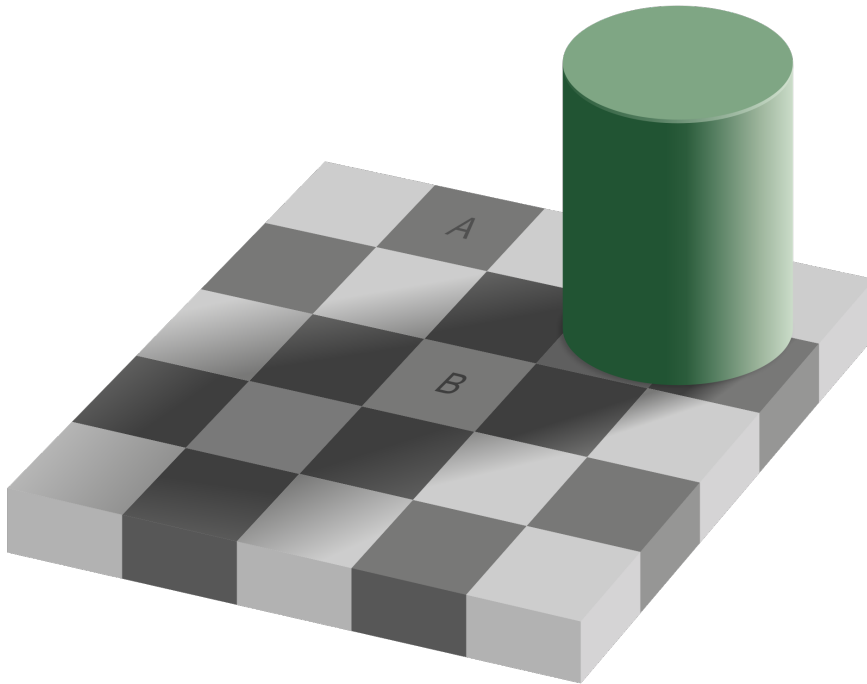


Figure 1.5 – Illusion de Adelson appelée "Ombre sur échiquier". Le gris de la zone A est rigoureusement identique à celui de la zone B.

Un des effets bien connus du contraste est qu'une plage donnée, de luminance fixe, apparaît plus ou moins lumineuse selon qu'elle est contiguë à une région elle-même plus ou moins lumineuse, comme illustré sur la Fig. 1.5.

1.2.2 Définition du contraste

On définit le contraste C par

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}. \quad (1.1)$$

C varie donc entre 0 et 1. Le contraste nul est obtenu lorsque $L_{\max} = L_{\min}$. Le contraste maximal est obtenu lorsque $L_{\min} = 0$, indépendamment de la valeur de L_{\max} .

Les mesures d'acuité évoquées plus haut ont toutes été réalisées avec un contraste de 1, ce qui montre leur caractère très restrictif. Il est évident que le contraste va modifier la capacité de détection d'un objet donné.

Ainsi, le contraste intervient directement dans l'évaluation de l'acuité et il est donc nécessaire de considérer deux paramètres : la taille et le contraste. Ces paramètres couvrent donc un espace à deux dimensions. On représente généralement la visibilité sous la forme d'une courbe de contours dans le plan. Pour mesurer la sensibilité au contraste de façon rigoureuse, on utilise généralement des réseaux.

L'idée des réseaux est ancienne puisque Foucault la proposait déjà en 1859 pour mesurer directement le pouvoir de résolution des appareils optiques.

1.2.3 Les réseaux spatiaux

De façon générale en physique, un *réseau* est un objet dont les propriétés se répètent de façon périodique dans l'espace. On appelle *motif* l'élément le plus simple qui est reproduit. Nous nous intéressons ici à des réseaux de luminance. Un réseau de luminance peut avoir des profils divers et variés : carré, triangulaire, sinusoïdal, etc. Pour des raisons mathématiques que nous verrons plus tard, ce dernier est le plus simple. C'est donc celui qui sera utilisé de façon exclusive. La dimension du motif constitue la *période*, que nous exprimons par un angle (deg). On définit également la *fréquence spatiale* $\nu = 1/\text{période}$, qui s'exprime en par degré (deg^{-1}).

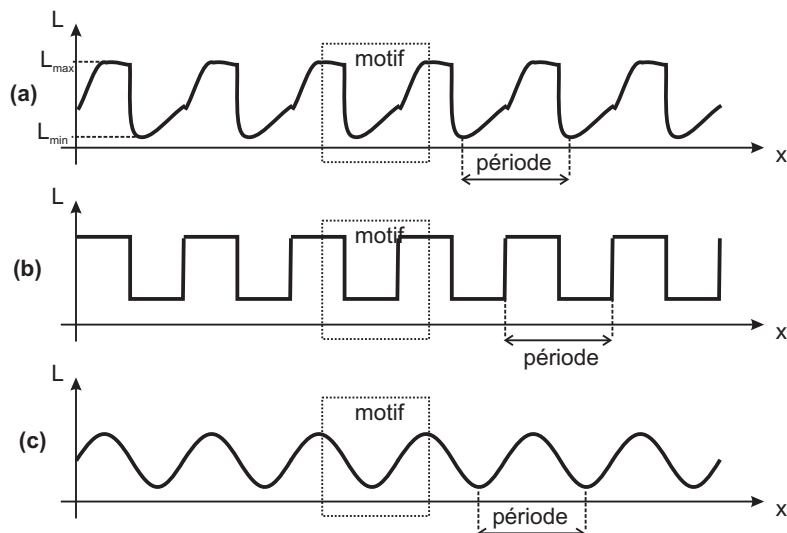


Figure 1.6 – Illustration de trois types de réseaux de luminance de même fréquence spatiale : (a) profil quelconque, (b) profil carré, (c) profil sinusoïdal.

De façon générale, la luminance d'un réseau spatial sinusoïdal de fréquence spatiale ν aura la forme

$$L(x) = L_0[1 + m \cos(2\pi\nu x)].$$

Écrit de cette façon, on peut facilement calculer le contraste, car $L_{\max} = L_0(1 + m)$ et $L_{\min} = L_0(1 - m)$, soit $C = m$ tout simplement.

Par exemple, une acuité visuelle de 10/10 indique que l'on est capable de distinguer des motifs de 1' séparés de 1'. La période correspondante est donc 2', ce qui correspond à une fréquence spatiale $\nu = 30 \text{ deg}^{-1}$.

Remarque. Ne pas confondre notre fréquence *spatiale* avec la fréquence, en générale temporelle, que l'on exprime en Hz. Nous utiliserons les fréquences temporelles au chapitre suivant.

1.3 Résolution dans le domaine fréquentiel spatial

1.3.1 Mesure de la sensibilité au contraste

Méthodologie

Le sujet a pour consigne de déceler la présence de raies sur un fond illuminé, ce qui conduit à déterminer le seuil de contraste juste perceptible C_{\min} et la sensibilité au contraste définie comme la quantité $1/C_{\min}$. Ceci est fait pour différentes valeurs de la fréquence spatiale ν .

Il faut comprendre qu'une grande sensibilité au contraste est donc une grande valeur de $1/C_{\min}$, c'est donc une faible valeur de C_{\min} , ce qui indique qu'un contraste faible suffit à voir le réseau.

Méthode utilisée en pratique

Dans la réalité, c'est beaucoup plus complexe. La notion de minimum détectable est pour le moins floue. La transition entre le contraste invisible et le contraste visible étant douce, on parle de pourcentage de *vu* ou de *non vu*. On obtient alors généralement une courbe possédant une allure similaire à celle représentée sur la Fig. 1.7. Ceci permet de mettre en évidence que la détectivité d'un signal peut fluctuer, lorsqu'on approche des limites de l'oeil.

Subjectivité

Rien n'interdit au sujet de déclarer qu'il a détecté l'objet, dans le mesure où il sait ce qu'il y a à voir. Par ce biais, il obtiendrait à coup sûr une courbe calée sur les 100 %. On a donc imaginé plusieurs types de parades. On peut par exemple considérer deux localisations (spatiale ou temporelle) possibles pour le réseau, et que le sujet ignore. Ainsi, lorsqu'il ne voit rien, il a 50 % de chances de donner la bonne réponse. On fixe généralement à 75 % de réponses exactes le seuil de détection.

On pourrait également

- utiliser des réseaux d'orientation inconnue, mais ce serait supposer que la sensibilité au contraste de dépend pas de cette orientation, ce qui est probablement faux ;
- utiliser des formes à reconnaître (lettres, etc.). En fait des effets complexes interviendraient : ressemblances, déductions.

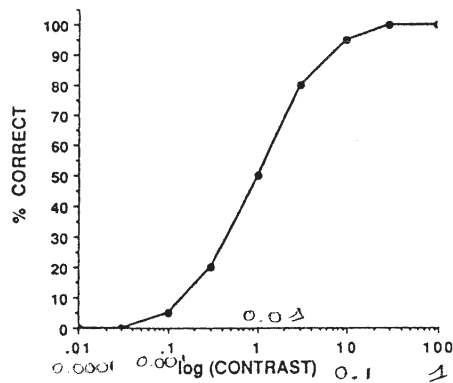


Figure 1.7 – Courbe typique des réponses en fonction du contraste.

Durée de l'expérience

Obtenir une excellente fiabilité suppose un grand nombre d'expériences et donc une durée considérable voire prohibitive de l'expérience. Si on estime qu'il faut 100 essais à une valeur de contraste et de fréquence spatiale données, si on veut tester 10 fréquences et 10 valeurs de contraste, on aura besoin de $10 \times 10 \times 100 = 10000$ présentations. A 4 s par présentation, on atteint 40000 s, soit plus de 11 h ! Cette durée est difficilement envisageable, même pour une expérience de laboratoire. Aussi, il est judicieux de réduire les plages de contraste et de fréquences testées à des valeurs prévisibles. On a également mis en place des méthodes plus sophistiquées.

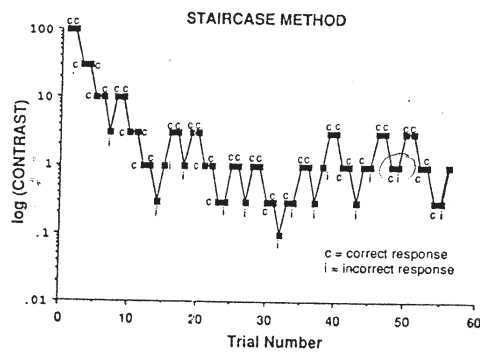


Figure 1.8 – Courbe typique des réponses lorsqu'on utilise la méthode des marches d'escalier.

La *méthode des marches d'escalier* est notamment utilisée souvent pour déterminer des seuils de façon statistique. Elle consiste à procéder par tâtonnements. Dans le cas où le réseau est perceptible, on en diminue le contraste. Dans le cas contraire, on l'augmente. On peut ainsi par itérations converger assez rapidement vers la valeur du contraste limite perceptible (à savoir une efficacité de perception de 50 %), comme illustré sur la Fig. 1.8.

Cette méthode réduit le nombre de tests nécessaires de façon significative.

1.3.2 Courbes de sensibilité au contraste

Le sujet observe un réseau sinusoïdal et ajuste le contraste juste perceptible, ceci pour chaque fréquence spatiale. Ceci est fait pour différentes luminances moyennes. On obtient le réseau de courbes de la Fig 1.9.

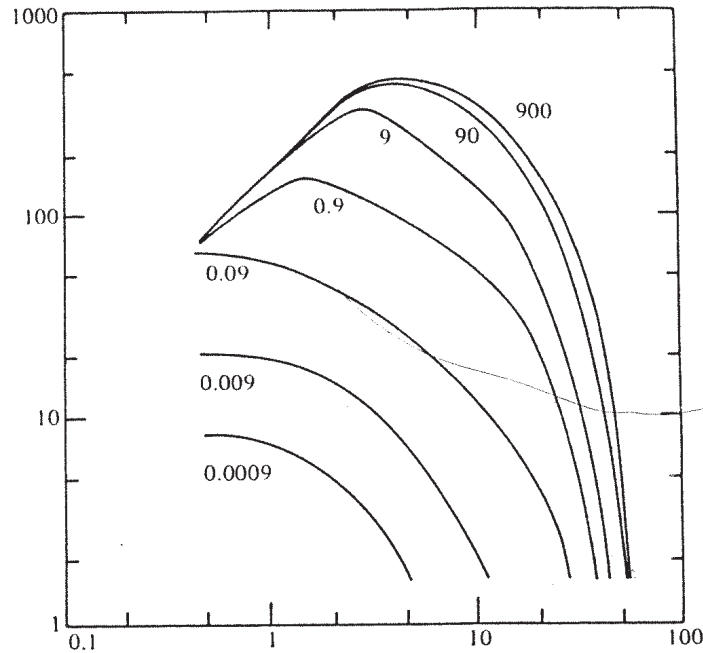


Figure 1.9 – Faisceau de courbes de sensibilité au contraste spatial pour divers éclairagements rétiens de 0,0009 à 900 Td. Abscisse : fréquence spatiale en c/deg, ordonnée : sensibilité au contraste ($1/\text{contraste minimum perceptible}$). D'après Buser [Buser].

- Aux faibles luminances, il y a une décroissance de la sensibilité lorsque ν augmente : ce résultat était prévisible, et illustre la faible acuité visuelle associée aux bâtonnets ;
- Aux moyennes et fortes luminances, il apparaît un maximum de sensibilité, et l'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses (soit pour $C = 1$) mesure la limite de perception d'un réseau de contraste maximum. Il s'agit de la mesure "classique" de l'acuité visuelle. On voit sur cet exemple la richesse d'information apportée par l'utilisation de réseaux.

La décroissance pour les fréquences spatiales élevées est prévisible, elle s'explique par l'effet de la diffraction, ainsi que par les différentes aberrations qui peuvent affecter l'œil. A noter que des études récentes montrent que la nature discrète de la rétine ne contribuait pas à cet effet.

En revanche, la décroissance de sensibilité au contraste pour les faibles fréquences spatiales (grands motifs, donc) est surprenante. Elle indique que des motifs trop grands sont mal détectés, ce qui peut paraître paradoxal. A ce stade, aucun argument optique ne permet d'expliquer cet effet, et il faut se tourner vers la neurophysiologie.

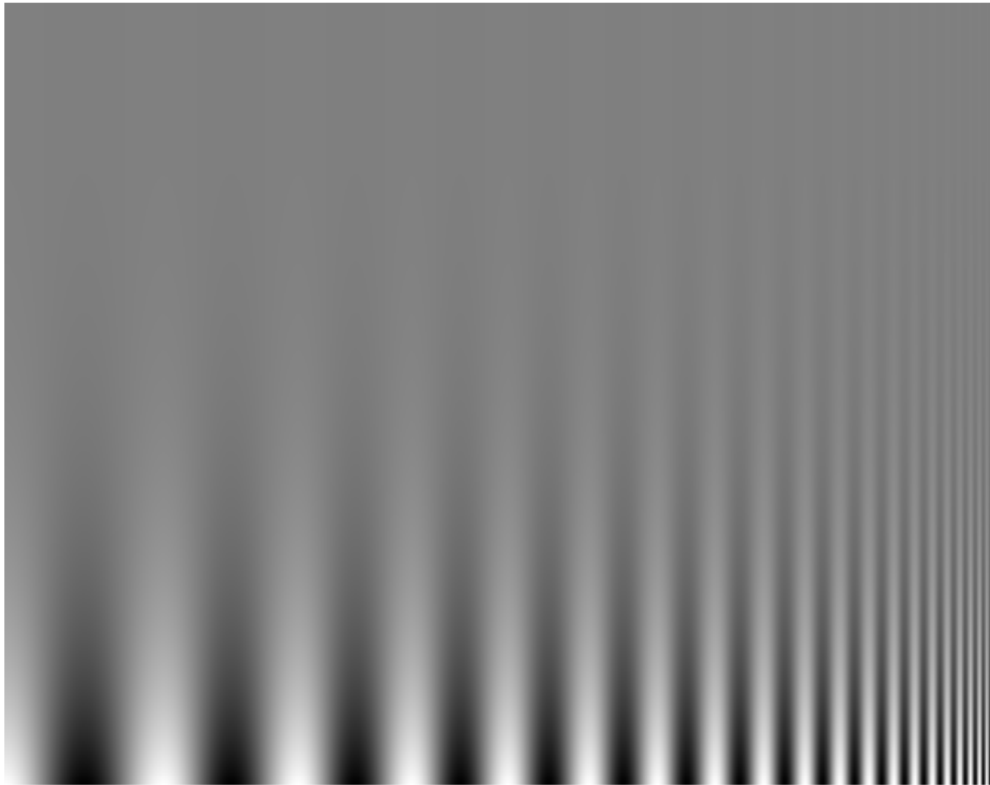


Figure 1.10 – Image de réseau possédant une fréquence spatiale qui augmente vers la droite, et un contraste qui diminue vers le haut. En observant cette image, on constate que la sensibilité au contraste est maximale dans une gamme de fréquences spatiales, mais chute à haut et (plus surprenant) basse fréquence. Il est également intéressant de faire le test à différentes distances d'observation.

1.4 Le modèle des champs récepteurs

1.4.1 Structure de la rétine

Pour comprendre la notion de champ récepteur, il d'abord s'intéresser à la constitution de la rétine. On rappelle que cette fine couche est constituée de neurones et appartient au cerveau. Comme l'illustre la Fig. 1.11, cette couche mince nerveuse est constituée d'un mosaïque d'environ 150 millions de *photorecepteurs* (cônes et bâtonnets). Les cellules photoréceptrices transmettent leur signal à la couche sous-jacente des *neurones bipolaires*. Ceux-ci élaborent à leur tour un signal électrique et le transmettent aux *neurones ganglionnaires*. Entre les photorécepteurs et l'ensemble cellules bipolaires - cellules ganglionnaires, il existent des cellules spéciales qui établissent des *connexions latérales*, si bien qu'une cellule ganglionnaire est connectée à un nombre relativement important de photorécepteurs, ceci étant d'autant plus marqué lorsqu'on se trouve à la périphérie de l'œil.

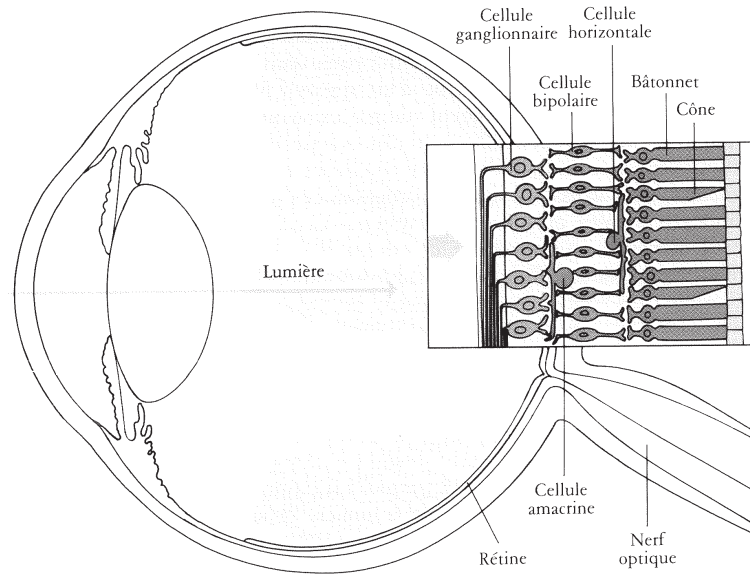


Figure 1.11 – Coupe de l'œil. L'agrandissement de la rétine montre la disposition des trois couches rétinienne. D'après Hubel [Hubel].

1.4.2 Mise en évidence des champs récepteurs

Dans les années cinquante, des expériences sont menées sur le chat [Hub59], dans le but décrypter la méthode de codage de l'information visuelle. On utilise un chat anesthésié, auquel on applique des stimuli visuels, et on enregistre les influx nerveux sur des fibres isolées du nerf optique. Dans cette expérience, dont la méthode expérimentale est décrite dans la Fig. 1.14, on a fait les observations suivantes :

1. sans aucun stimulus, on enregistre un signal faible irrégulier, entre 1 et 20 pulses à la seconde ;
2. si l'on applique un stimulus lumineux uniforme sur tout le champ de vision, on observe le même signal faible et irrégulier ;
3. si l'on applique un stimulus localisé de petite taille à un endroit bien choisi, on observe un signal important pendant la durée du stimulus ;
4. si l'on augmente la taille du stimulus, le signal redevient faible et irrégulier.
5. si l'on produit un stimulus sous la forme d'un anneau lumineux (différence entre les deux cas précédents), alors on observe une absence totale de signal pendant la durée du stimulus.

Les résultats des enregistrements sont récapitulés sur Fig. 1.12. Ces observations, similaires sur la trentaine de chats qu'a nécessité l'étude scientifique initiale, confirment que le signal nerveux n'est pas une simple lecture de l'intensité lumineuse en un point de la rétine, mais véritablement une réponse différentielle d'autant plus intense que la zone rétinienne illuminée a, dans son voisinage, immédiat des zones peu illuminées.

La réponse nerveuse résulte donc d'une opération entre les différents signaux recueillis par toutes une assemblée de photorécepteurs. On dit alors que ces photorécepteurs sont assemblés en *champs récepteurs*.

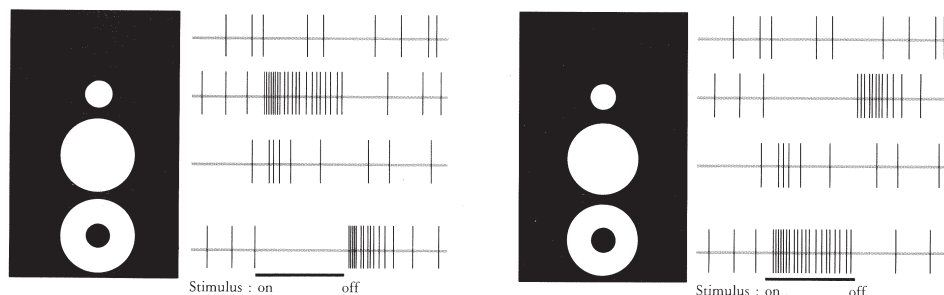


Figure 1.12 – Enregistrements de l'activité des cellules ganglionnaires. Gauche : Centre ON, droite : Centre OFF. D'après Hubel [Hubel].

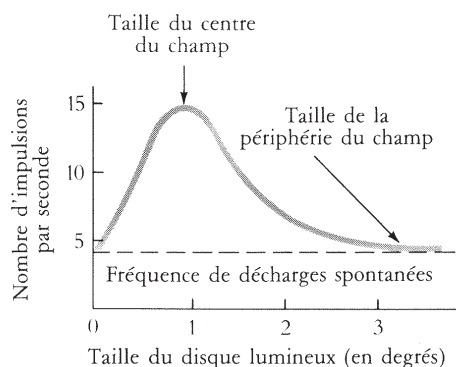


Figure 1.13 – Détermination du diamètre du champ récepteur. D'après Hubel [Hubel].

Dans le cas présenté, la réponse est maximale quand le centre est illuminé et la périphérie peu éclairée, on parle de cellules à centre ON. Ils existe aussi des champs récepteurs aux propriétés opposées (réponse maximale lorsque c'est la périphérie uniquement qui est illuminée), on parle alors de cellules à centre OFF.

En utilisant des faisceaux d'excitation de diamètre croissant, on peut mesurer la diamètre du centre récepteur, comme illustré sur la Fig. 1.13. On montre observe alors que la taille des champs récepteurs diminue lorsque la distance à la fovéa augmente. Chez le singe, on trouve une taille de l'ordre de 2° dans les meilleurs cas.

On pourrait s'imaginer à tort une mosaïque de champs récepteurs. En fait, il y a un recouvrement notable et chaque photorécepteur participe ainsi, de fait, à un grand nombre de photorécepteurs.

1.4.3 Rôle des champs récepteurs pour la sensibilité au contraste

Nous l'avons vu dans la partie précédente, la fonction de filtre passe-bas du système visuel permet d'expliquer qualitativement l'allure de la courbe de sensibilité au contraste pour les grandes fréquences. A basse fréquence, la structure spatiale des champs récepteurs permet de donner une interprétation satisfaisante. En fonction de la taille des champs récepteurs, la réponse à un stimulus d'une certaine fréquence spatiale va être très différente selon le rapport de taille entre ces deux grandeurs, comme illustré sur la Fig. 1.15. On

METHODS

In this series of experiments twenty-four cats were used. Animals were anaesthetized with intraperitoneal thiopental sodium (40 mg/kg) and light anaesthesia was maintained throughout the experiment by additional intraperitoneal injections. The eyes were immobilized by continuous intravenous injection of succinylcholine; the employment of this muscle relaxant made it necessary to use artificial respiration. Pupils of both eyes were dilated and accommodation was relaxed by means of 1% atropine. Contact lenses used with a suitably buffered solution prevented the corneal surfaces from drying and becoming cloudy. The lids were held apart by simple wire clips.

A multibeam ophthalmoscope designed by Talbot & Kuffler (1952) was used for stimulation and viewing the retina of the left eye. Background illumination was usually about 0.17 log. metre candles (m.c.), and the strongest available stimulus was 1.65 log. m.c. Many sizes and shapes of spots of light could be produced, and these were well focused on the retina. Stimulus durations were of the order of 1 sec.

For binocular studies a different method of light stimulation was used. The animal faced a large screen covering most of the visual field. On this screen light spots of various sizes and shapes were projected. The light source was a tungsten filament projector mounted on an adjustable tripod. Stimuli could be moved across the screen in various directions and with different speeds. Spots subtending an angle as small as 12 min of arc at the cat's eyes could be obtained, but generally 0.5–1° spots were used for mapping receptive fields. (Dimensions of stimuli are given in terms of equivalent external angles; in the cat 1 mm on the retina subtends about 4°.) Spots were focused on the two retinas with lenses mounted in front of the cat's eyes. Lenses for focusing were selected by using a retinoscope. Spot intensities ranged from -0.76 to 0.69 log. cd/m². A background illuminance of -1.9 log. cd/m² was given by a tungsten bulb which illuminated the whole screen diffusely. Intensities were measured by a Macbeth Illuminometer. Values of retinal illumination corresponding to these intensities (Talbot & Kuffler, 1952, Fig. 4) were within the photopic range but were lower than those employed with the ophthalmoscope. Whenever the two methods of stimulation were checked against each other while recording from the same unit they were found to give similar results. This principle of projecting light spots on a screen was described by Talbot & Marshall (1941). Areas responsive to light were marked on sheets of paper fixed on the screen, in such a way as to indicate whether the responses were excitatory or inhibitory. The sheets of paper then provided permanent records of these responses, and showed the shape, size and orientation of the regions.

Figure 1.14 – Extrait de l'article original par Hubel et Wiesel publié en 1959 [Hub59] décrivant la méthode expérimentale utilisée. Ames sensibles s'abstenir.

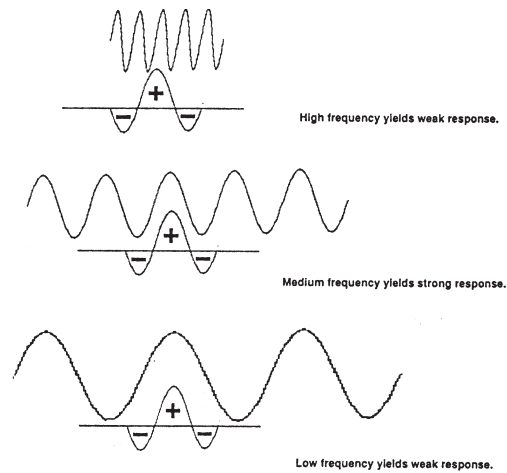


Figure 1.15 – Réponse d'un champ récepteur à différentes fréquences spatiales. Haut : à haute fréquence, la réponse est faible ; Milieu : la taille du champ récepteur correspond à la fréquence spatiale, la réponse est maximale ; Bas : A faible fréquence, la réponse est faible.

comprend aisément que la réponse optimale est obtenue lorsque la fréquence spatiale coïncide avec la taille du champ récepteur. Ainsi chaque classe de champ récepteur est sensible à une certaine gamme de fréquences spatiales.

Cet effet est responsable de la célèbre *illusion de Hermann*, qui est illustrée sur la Fig. 1.16. La diminution de brillance aux intersections des lignes blanches peut être interprétée grâce aux champs récepteurs. Les champs récepteurs à centre ON qui perçoivent une ligne ont leur périphérie fortement inhibée, davantage en tout cas que ceux aux intersections. Ces derniers ont un pourtour moins inhibé, donc la réponse est plus faible, d'où une sensation de luminosité moindre. On voit en outre que l'effet est plus sensible sur les zones périphériques de la rétine, lieu des champs récepteur les plus adaptés à l'image présentée.

Ce fonctionnement permet de favoriser au sein du champ visuel les zones contrastées et les contours nets par oppositions aux zones homogènes, comme illustré sur la Fig. 1.17. Deux avantages : la quantité d'informations à transmettre au cerveau est ainsi réduite aux contours et cela favorise la reconnaissance de formes, plus utilisée pour la vision qu'une naïve "cartographie de luminance". Aussi, le système visuel sera moins sensible aux différences d'éclairage global.

1.5 Le modèle des canaux spatiaux

1.5.1 Description

Le point de vue des champs récepteurs exposé ci-dessus se contente d'une description directe (découpage du champ visuel en champs récepteurs). Mais les choses ne s'arrêtent bien sûr pas là et l'information visuelle passe par le corps genouillé latéral puis le cortex visuel.

Pour être plus proche du processus de vision et également pour aller plus loin dans la compréhension de la vision, on a développé la notion de *canaux spatiaux avec spécificité*

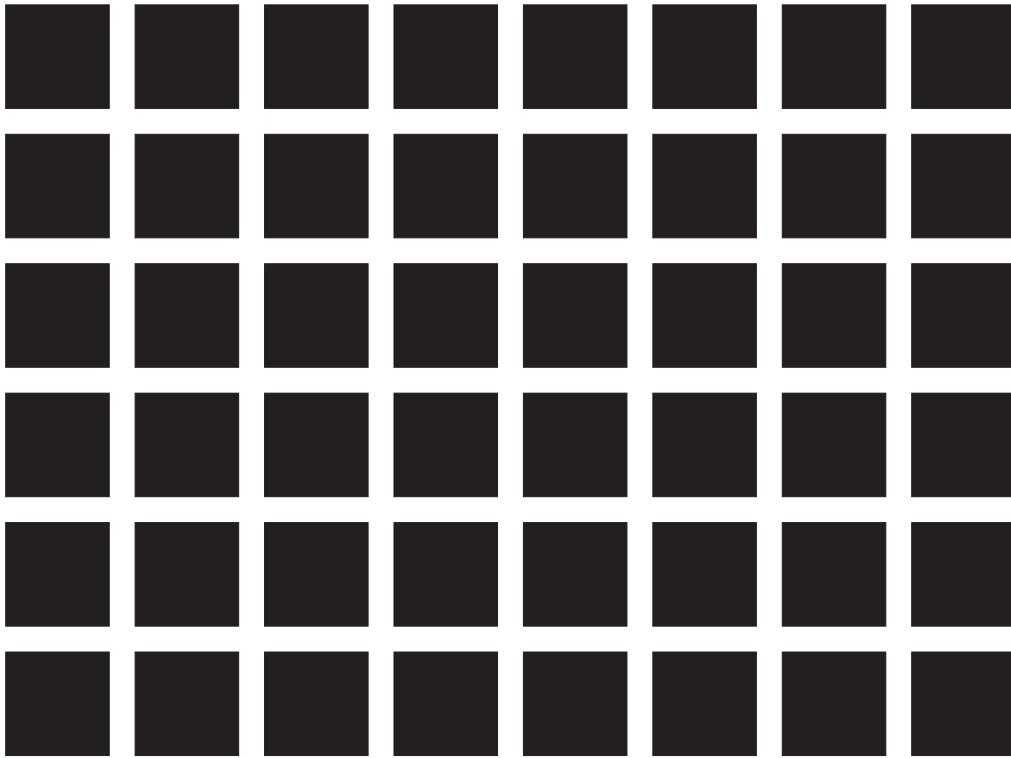


Figure 1.16 – Illusion du contraste de Hermann. La diminution de brillance aux intersections des lignes blanches peut être interprétée grâce aux champs récepteurs. Les champs récepteurs qui perçoivent une ligne ont leur périphérie fortement inhibée. Davantage en tout cas que ceux aux intersections. Ces derniers ont un pourtour moins inhibé, donc la réponse est plus faible, d'où une sensation de luminosité moindre.

fréquentielle. L'activité visuelle est donc décomposée sur plusieurs canaux de vision, chacun possédant son domaine propre de fréquences.

1.5.2 Expériences de mise en évidence

Il s'agit d'une expérience classique dite d'adaptation. On part de l'idée qu'un canal stimulé longtemps est "fatigué" et devient moins sensible pour un usage ultérieur. L'expérience se déroule de la façon suivante :

1. On adapte le sujet à un réseau d'une certaine fréquence spatiale à haute luminance ;
2. On lui présente ensuite un réseau de même fréquence que le réseau adaptant. Pendant quelques secondes, sa sensibilité au contraste est diminuée, alors qu'elle reste intacte pour les fréquences éloignées de la fréquence référence. (Fig. 1.18)

Cette expérience met en évidence la sélectivité en fonction de la fréquence spatiale, mais ne permet pas de caractériser un canal unique, car les canaux voisins sont également affectés.

La présence de canaux distincts doit conduire à la discrimination de deux réseaux, uniquement s'ils font intervenir un canal différent.

On peut donc se placer à la limite de détection et présenter au sujet deux réseaux de fréquences ν différentes. Si les deux réseaux simulent le même canal, ils sont in-

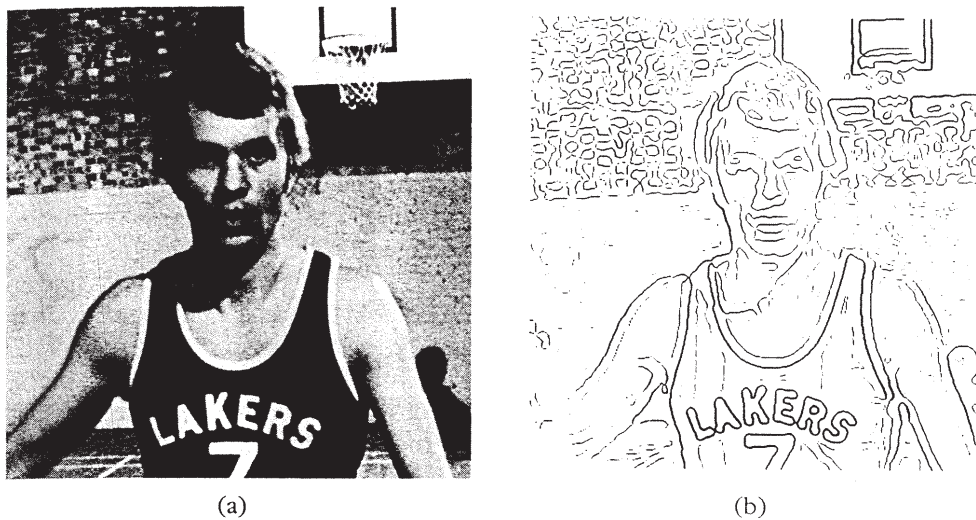


Figure 1.17 – Illustration, partant d'une image (gauche), des zones qui sont mises en évidence par le fonctionnement des champs récepteurs. Seuls les bords d'image donnent lieu à un signal.

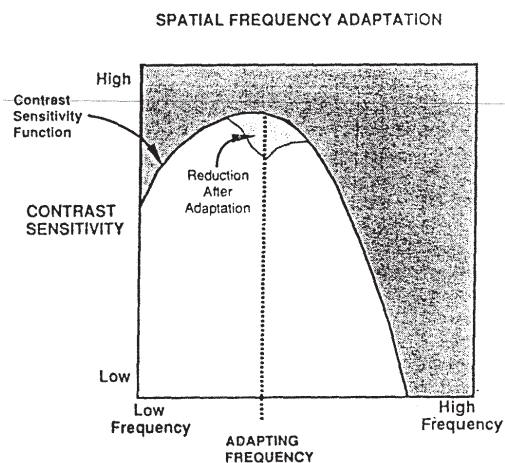


Figure 1.18 – Expérience d'adaptation à la fréquence spatiale.

différentiables. Sinon, on distingue la différence. C'est au moyen de ce genre d'expérience qu'on a pu mettre en évidence la présence de six à huit canaux. (Fig. 1.19)

1.6 L'acuité visuelle à proximité du seuil absolu de détection

Il est d'observation courante que notre acuité visuelle se dégrade lorsque la luminosité devient extrêmement faible. Cette chute est loin d'avoir trouvé son explication définitive. On sait qu'elle n'est pas due à l'augmentation du diamètre pupillaire car des expériences avec une pupille artificielle montrent le même comportement. Cette variation d'intensité

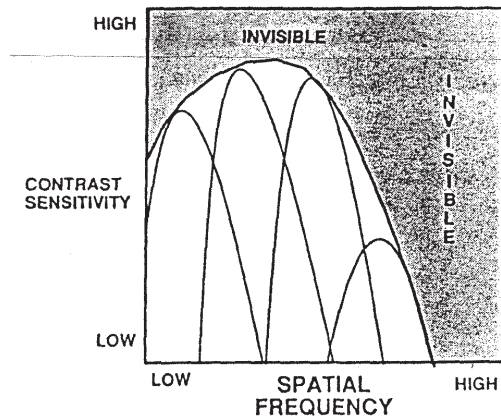


Figure 1.19 – Variation de la sensibilité au contraste en fonction de la fréquence spatiale, pour différents canaux distincts.

ne peut être attribuée qu'aux propriétés de la rétine et du système nerveux ou à la lumière elle-même.

Tout se passe dans la pratique comme si, à faible intensité, la mosaïque rétinienne était remplacée par une mosaïque plus grossière. En 1928, Hecht avance l'idée que les photorécepteurs ont des sensibilités différentes si bien que la densité de détecteurs fonctionnels peut bien augmenter avec l'intensité d'éclairage. Cette hypothèse faisait intervenir une trop grande gamme de sensibilités et a dû être écartée.

Par contre, l'hypothèse de la mosaïque rétinienne avec une finesse fonctionnelle changeante a été conservée, conjuguée avec l'absorption fluctuante des quanta de lumière⁴.

Plaçons nous donc dans des conditions de vision scotopique, avec une matrice de bâtonnets. Considérons la vision d'un objet noir au milieu d'un fond de luminance faible, comme illustré sur la Fig. 1.20. Si la luminance est forte (1000 photons par photorécepteur), l'éclairage est assez peu bruité. En revanche, pour un faible nombre de photons (par ex. 0,5 en moyenne), les zones éclairées recueillent 0, 1, ou 2 photons. L'illumination devient très aléatoire (on dit que l'image est 'bruitée'), ce qui dégrade de fait l'acuité visuelle.

1.7 Conclusion

Nous avons donc vu que la perception d'une scène dépasse grandement la simple analyse d'intensité que peut effectuer le film d'un appareil photographique. La rétine, qui est une partie du cerveau, effectue une ensemble complexe d'opérations de comparaisons d'intensité des signaux.

Il ne s'agit en rien de *défauts* du système visuel, même si quelques cas particuliers permettent de créer une illusion. Il s'agit au contraire d'une méthode de fonctionnement hautement évoluée, qui fait que notre système visuel est capable de s'adapter à une grande variété de situations.

4. Tout faisceau lumineux est composée de particules élémentaires appelées *photons*. On n'est pas sensible à cette nature corpusculaire dans la plupart des expériences d'optique. Toutefois, on a pu la mettre en évidence en laboratoire, lorsqu'on utilise des faisceaux lumineux très fortement atténués. On peut alors détecter les photons individuellement.

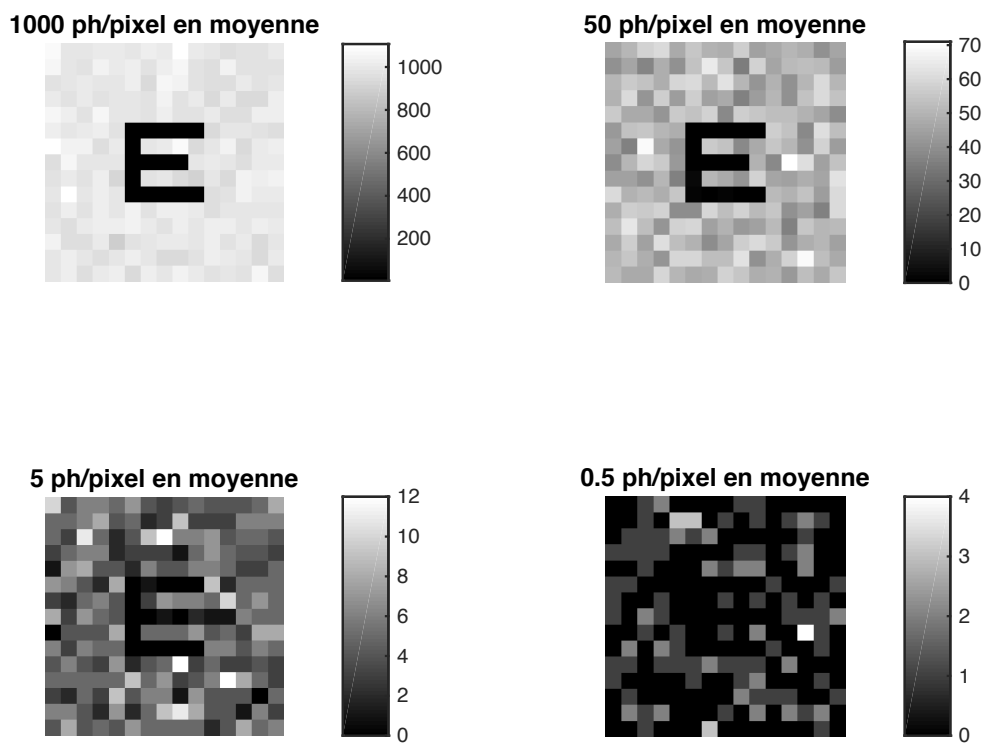


Figure 1.20 – Chute de l'acuité visuelle au seuil de détection. Au fur et à mesure que l'éclairement diminue, les régions illuminées par les photons sont éclairées de façon spatialement plus aléatoires, ce que dégrade l'acuité visuelle.

Chapitre 2

Sensibilité temporelle

Il s'agit ici d'examiner comment le système visuel est capable, soit de percevoir des stimulations de courtes durée, soit de discriminer des stimuli se succédant à une cadence déterminée.

Dans tout ce chapitre, les hypothèses sont :

- que du noir, du blanc, et du gris, pas de couleur,
- un seul œil, emmétrope, accomodé,
- pas de structure spatiale (réseau, image) à observer, simplement des plages homogènes de luminance modulée dans la temps.

2.1 Luminosité des lumières brèves, loi de Bloch

La *loi de Bloch* permet de quantifier, chez l'homme, l'influence d'un stimulus bref.

Le stimulus est caractérisé par sa luminance L et la durée T pendant laquelle il est appliqué. On s'intéresse à la plus petite valeur de luminance, L_{\min} , qui donne un stimulus détectable. La loi de Bloch comporte deux régimes :

- lorsque la durée T est inférieure à une durée critique t_c , L_{\min} est inversement proportionnel à T . Dit autrement, plus la durée T augmente, plus le seuil de luminance est bas. Tout se comporte comme s'il se produit une sommation de la quantité d'énergie reçue. Pour les cônes, on a mesuré que $t_c = 30$ ms. Pour les batonnets, $t_c = 100$ ms ;
- lorsque T est largement supérieur à t_c , L_{\min} est alors indépendant de T .

Pour illustrer cet effet graphiquement, on a coutume de tracer $\log(L_{\min}T)$ en fonction de $\log T$ (Fig. 2.1).

- Pour $T < t_c$, on écrit que $L_{\min}T = \text{Cte}$, ce qui se traduit par une courbe horizontale.
- Pour $T > t_c$, L_{\min} ne dépend plus de T , on peut donc écrire $L_{\min} = L_0$ ou encore $L_{\min}T = L_0T$, soit $\log(L_{\min}T) = \log L_0 + \log T$, ce qui traduit par une droite de pente 1¹.

2.2 Sensibilité au contraste temporel

Pour caractériser la sensibilité au contraste temporel, on demande à un sujet d'observer une source étendue, dont la luminance oscille sinusoïdalement à une fréquence temporelle

1. Sauriez-vous représenter graphiquement $\log(L_{\min})$ en fonction de $\log T$?

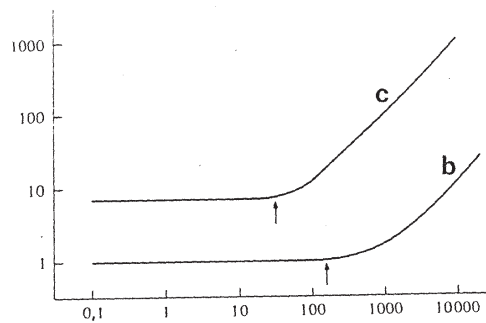


Figure 2.1 – Variation du seuil de luminance L_{\min} en fonction de la durée T du stimulus. En ordonnée, $\log(L_{\min}T)$, en abscisse, $\log T$. D'après Buser [Buser].

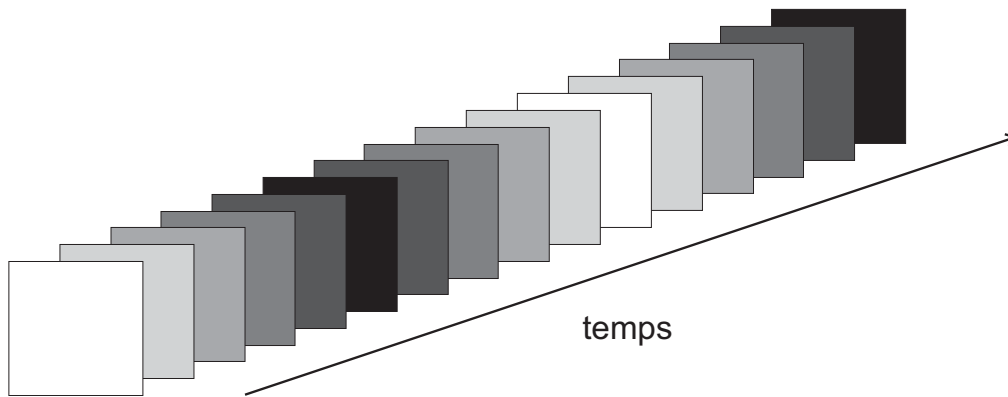


Figure 2.2 – Illustration d'une plage de luminance modulée dans le temps.

donnée. La diamètre pupillaire est fixé à 1,5 mm, si bien que l'éclairement rétinien varie proportionnellement à la luminance de la source.

La luminance $L(t)$ est décrite généralement par la relation

$$L(t) = L_0[1 + m \cos(2\pi f t)],$$

où f est la *fréquence temporelle*² des oscillations, que l'on exprime en Hz. Une fréquence de 2 Hz indique que la luminance oscille deux fois pendant une période. Comme précédemment, le contraste est m . Il s'agit cependant d'un contraste temporel.

Lors de l'expérience, le sujet doit ajuster le contraste au seuil de perception C_{\min} . Cette étude est faite en fonction de la fréquence, et pour plusieurs luminances moyennes. On a représenté sur la Fig. 2.3 la sensibilité au contraste ($1/C_{\min}$) en fonction de la fréquence temporelle f . La figure obtenue appelle les remarques suivantes :

1. Pour les niveaux moyens ou élevés d'éclairement, la sensibilité au contraste passe par un maximum obtenu pour des fréquences aux alentours de 10-25 Hz.
2. Il existe pour chaque éclairement une fréquence maximale, pour laquelle le sujet ne perçoit plus aucun papillotement, même si le contraste est de 100%.
3. Lorsque l'éclairement rétinien augmente, ce maximum se déplace vers les hautes fréquences.

2. A ne pas confondre, donc, avec la fréquence spatiale du chapitre précédent.

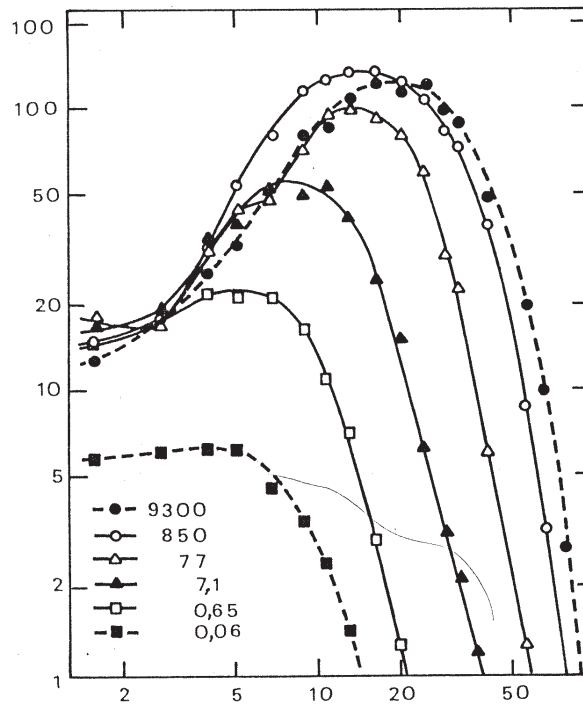


Figure 2.3 – Courbes de sensibilité au contraste en fonction de la fréquence du stimulus. Les différents valeurs indiquées sur le graphe sont les éclaircissements rétiens exprimés en troland. Abscisse : Fréquence en Hertz, ordonnée : sensibilité au contraste. D'après Buser [Buser].

Cette fréquence est appelée *fréquence critique de fusion* (f.c.f.).

Au dessus de la f.c.f., La luminance perçue est la luminance de la source moyennée sur une période temporelle (*Loi de Talbot-Plateau*). Dans le cas de notre variation sinusoïdale, cette moyenne vaut L_0 .

2.3 Interprétation du phénomène de fusion des lumières rapidement variables

Si aucune explication ne satisfait tout la communauté, tous les modèles sont basés sur une notion de filtrage passe-bas, en se basant sur la similarité des courbes obtenues dans le domaine spatial et temporel. Ici, le filtre passe-bas est temporel ! Il faut l'imaginer comme un retard à l'établissement, qui va donc diminuer l'influence des fréquences élevées.

En ce qui concerne la moindre sensibilité aux faibles fréquences temporelles, l'interprétation est à chercher dans le cortex cérébral. Il y a en effet une tendance à faire abstraction des phénomènes dont les variations sont trop lentes, pour se concentrer sur les fréquences plus pertinentes. Ce comportement n'est pas limité à la vision, mais se retrouve dans les cinq sens. Pour l'ouïe, cela permet par exemple d'être capable d'écouter une conversation malgré un fond sonore.

Chapitre 3

Sensibilité spatio-temporelle, perception du mouvement

Le problème du mouvement est en principe à la limite des processus liés à la sensation et de ceux plus complexes de la perception. Cependant, les études électrophysiologiques ont permis de mettre en évidence que le mouvement d'un stimulus constitue une qualité fondamentale, qui est codée au même titre que de nombreuses autres.

Deux mécanismes peuvent assurer la vision du mouvement :

1. soit l'œil reste fixe et l'image mobile se déplace sur la rétine,
2. soit l'œil suit le déplacement de l'objet.

La première méthode apparaît de loin comme étant la plus précise, et c'est celle que nous étudierons ici. De plus, nous ne nous intéresserons qu'aux mouvements réels.¹

3.1 Sensibilité au mouvement

On considère une cible qui s'est déplacée d'une distance angulaire a , à une vitesse constante v , pendant une durée T . Nous avons donc $a = v \times T$. Pour caractériser la capacité du système visuel à percevoir un déplacement, on peut s'intéresser à diverses grandeurs limites $a_{\min} = f(v, T)$, $T_{\min} = f(a, v)$, ou $v_{\min} = f(a, T)$.

3.1.1 Etude du seuil de vitesse v_{\min}

Par seuil de vitesse limite v_{\min} , il faut comprendre plus petite vitesse perceptible.

Influence de la durée d'exposition

On constate que v_{\min} diminue lorsque T augmente, et ce jusqu'à des valeurs relativement élevées de T , de l'ordre de 16 s, comme illustré sur la Fig. 3.1.

Influence de la luminance

Pour une donnée d'exposition fixée, v_{\min} diminue lorsque la luminance augmente, comme illustré sur la Fig. 3.1.

1. On aurait par exemple un mouvement apparent si deux points lumineux identiques et distants apparaissaient successivement.

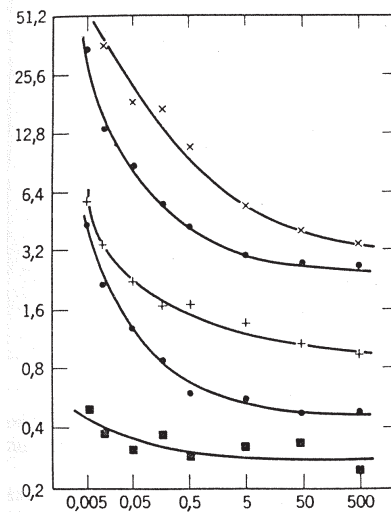


Figure 3.1 – Vitesse minimale d'une source pour que son mouvement soit perceptible, en fonction de sa luminance. Vitesse en min d'arc par s. Luminance en mL (échelle Log) Durées d'exposition de haut en bas, 1/8, 1/4, 1, 2 et 16 s. D'après Buser [Buser].

Influence de l'excentricité

La vitesse limite détectable augmente de la fovea vers la périphérie (typiquement un facteur 10 à 20 degrés, pour une durée de quelques secondes, avec une luminance fixe).

3.1.2 Etude du déplacement absolu a_{lim}

La valeur à retenir est de 20 secondes d'arc dans la fovea. Cette limite monte à 3 degrés à 20 degrés et 5 degrés à 40 degrés.

3.2 Réseaux papillotants

3.2.1 Réalisation d'un réseau papillotant

Il s'agit d'étudier la dépendance de la courbe de sensibilité au contraste spatial que nous avons vu précédemment. On souhaite associer deux types stimulus tels que ceux qu'on a étudiés séparément.

Pour cela, les chercheurs ont eu très tôt l'idée des réseaux dont le contraste luminance est modulé sinusoidalement au cours du temps, comme illustré sur la Fig. 3.2. Mathématiquement, les variations spatio-temporelles de la luminance $L(x, t)$ s'écrivent

$$L(x, t) = L_0[1 + m \cos(2\pi ft) \cos(2\pi \nu x)],$$

où l'on reconnaît l'expression du réseau spatial du chapitre 1, avec en outre un contraste modulé par un facteur $\cos(2\pi ft)$. Les variations de la fonction $L(x, t)$ en fonction de x , à différents instants, sont illustrées sur la Fig. 3.2.

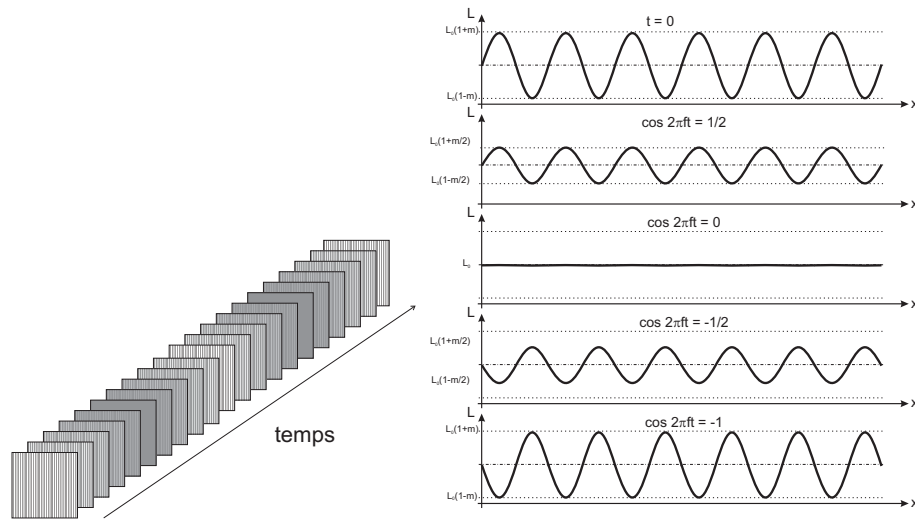


Figure 3.2 – Réseau modulé périodiquement dans le temps. Variations de la fonction $L(x, t)$

3.2.2 Expérience et résultats

Le sujet observe le réseau décrit précédemment et ajuste la contraste m au seuil de perception. Comme d'habitude, la sensibilité au contraste est définie par $1/C_{\min}$.

Les mesures sont effectuées de deux façons :

- soit à f constante, et on fait varier ν ,
- soit à ν constante, et on fait varier f .

Courbes à fréquence temporelle f constante

Le résultat des expériences est représenté sur la Fig. 3.3. On peut faire trois constatations :

1. La décroissance de la sensibilité aux fortes fréquences spatiales ν est la même quelque soit la fréquence temporelle : la sensibilité est limitée par la chute d'acuité visuelle dans les grandes fréquences spatiales, comme nous l'avons vu sur les réseaux statiques dans le chapitre 1 ;
2. A faible fréquence temporelle, la sensibilité chute aux faibles fréquences spatiales. Nous sommes en effet dans des conditions proches du réseau statique du chapitre 1, cette chute étant expliquée par le structure en champs récepteurs. En revanche, pour les fréquences temporelles plus élevées, nous nous rapprochons du cas du chapitre 2 (la faible fréquence spatiale est voisine d'une illumination homogène dans l'espace), et la fréquence temporelle élevée nous place dans le régime de bonne sensibilité vu sur la Fig. 2.3 du chapitre 2.

Courbes à fréquence spatiale ν constante

Le résultat des expériences est représenté sur la Fig. 3.4. On peut faire des constatations identiques au paragraphe précédent, si on échange les fréquences f et ν . Lorsque ν tend est faible, on retrouve la courbe de sensibilité à la fréquence temporelle et la fréquence critique de fusion. Ici encore, on peut mettre en évidence des interactions spatio-temporelles aux

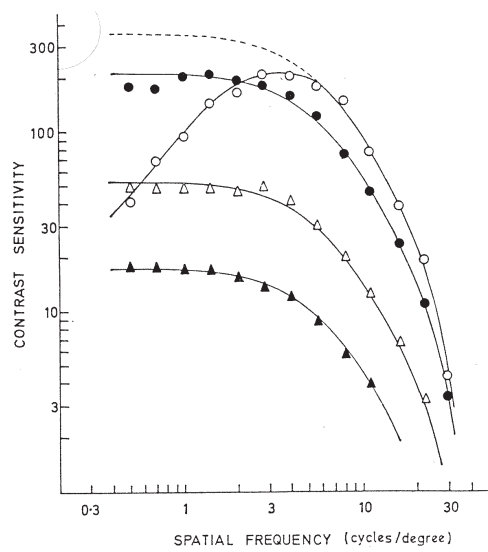


Figure 3.3 – Sensibilité au contraste pour différentes fréquences temporelles f , en fonction de la sa fréquence spatiale ν . On ne s'intéresse qu'aux deux courbes supérieures : ronds blancs : 1 Hz, ronds noirs : 6 Hz. D'après Robson [Rob66].

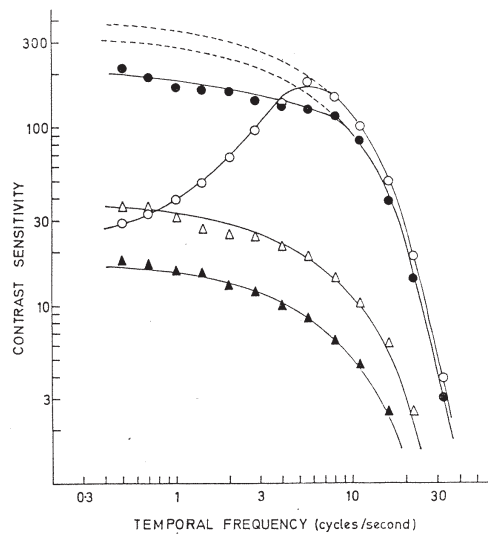


Figure 3.4 – Sensibilité au contraste pour différentes fréquences spatiales ν , en fonction de la sa fréquence temporelle f . Ici encore, on ne s'intéresse qu'aux deux courbes supérieures : ronds blancs : 0,5 c/deg, ronds noirs : 4 c/deg. D'après Robson [Rob66].

faibles f si ν élevé. Les deux réseaux de courbes sont parfaitement symétriques, ce qui montre que les deux mécanismes de détection interviennent en parallèle.

Récapitulatif

On voit donc que le système visuel est optimisé pour une bande de fréquences, que ce soit dans le domaine spatial et fréquentiel. En particulier, un signal faiblement modulé spatialement est davantage visible s'il est modulé temporellement, et inversement. Le tableau 3.1 et la Fig. 3.5 illustrent cette double dépendance.

$1/C_{\min}$	$\nu = 0.1 \text{ deg}^{-1}$	$\nu = 1 \text{ deg}^{-1}$	$\nu = 10 \text{ deg}^{-1}$
$f = 0.1 \text{ Hz}$	+	+++	-
$f = 1 \text{ Hz}$	+++	+++	-
$f = 10 \text{ Hz}$	-	-	-

Table 3.1 – Récapitulatif de la sensibilité au contraste dans le domaine spatio-temporel.

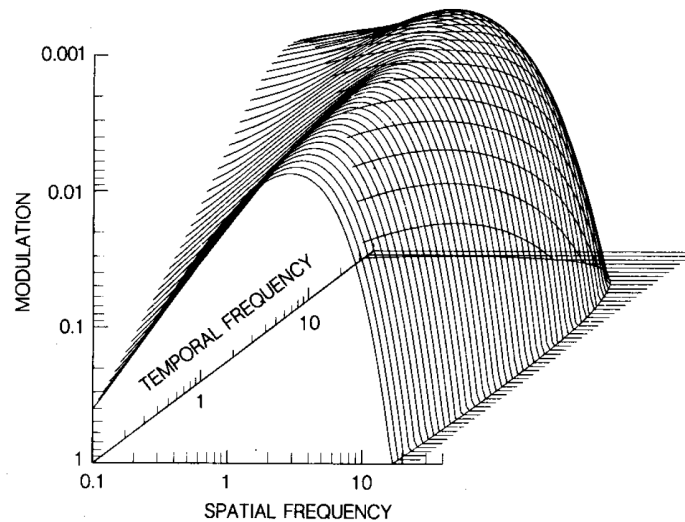


Figure 3.5 – Récapitulatif de la sensibilité au contraste dans le domaine spatio-temporel. D'après Kelly [Kel85].

3.3 Réseaux défilants

3.3.1 Réalisation d'un réseau défilant, lien avec un réseau modulé dans le temps

Le réseau défilant est le moyen le plus simple de simuler un mouvement. La luminance d'un réseau défilant peut s'écrire

$$L(x, t) = L_0[1 + m \cos(2\pi(\nu x - ft))].$$

Cette relation décrit la propagation d'une onde progressive, comme illustré sur la Fig. 3.6. En outre,

$$L(x, t + \epsilon) = L_0[1 + m \cos(2\pi(\nu x - f(t + \epsilon)))]$$

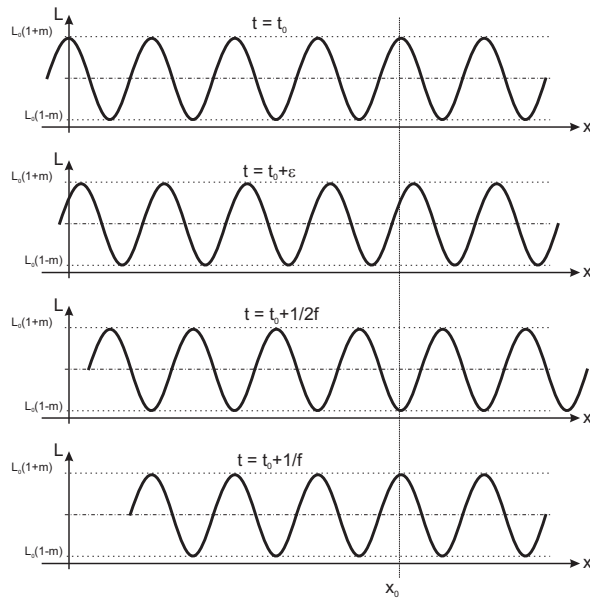


Figure 3.6 – Réseau défilant.

$$= L_0[1 + m \cos(2\pi(\nu(x - f\epsilon/\nu) - ft))] = L(x - f\epsilon/\nu, t).$$

Au point x , au temps $t + \epsilon$, l'amplitude de l'onde est celle qu'il y avait au point $x - f\epsilon/\nu$ au temps t . A un instant donné, l'amplitude oscille spatialement. A un endroit donné, l'amplitude oscille au cours du temps. Pour une durée ϵ , il y a eu un déplacement d'une quantité $f\epsilon/\nu$. La vitesse de défilement V est liée aux fréquence spatiale et temporelle, car

$$V = \frac{f}{\nu}$$

3.3.2 Expériences et résultats

On expose le sujet au défilement prolongé d'un réseau de fort contraste. On présente ensuite d'autres réseaux défilants au sujet adapté.

Les résultats à retenir sont les suivants :

- Le seuil de contraste augmente pour un réseau identique au réseau adaptant (la sensibilité diminue donc) ;
- Le seuil de contraste n'est pas modifiée pour un déplacement dans le sens opposé ;
- L'adaptation est d'autant plus importante que le contraste du réseau adaptant est grand ;
- Il y a illusion de mouvement en sens opposé lorsque le défilement s'arrête.

Il est important de remarquer que le cas du réseau papillotant est lié aux réseaux défilants. En effet, l'expression d'un réseau papillotant

$$L_0 [1 + m \cos(2\pi\nu x) \cos(2\pi f t)]$$

s'écrit aussi²

$$L_0 \left[1 + \frac{m}{2} \cos(2\pi(\nu x - ft)) + \frac{m}{2} \cos(2\pi(\nu x + ft)) \right].$$

2. Il faut appliquer la relation $\cos a \cos b = \frac{1}{2}[\cos(a + b) + \cos(a - b)]$

Chapitre 3. Sensibilité spatio-temporelle

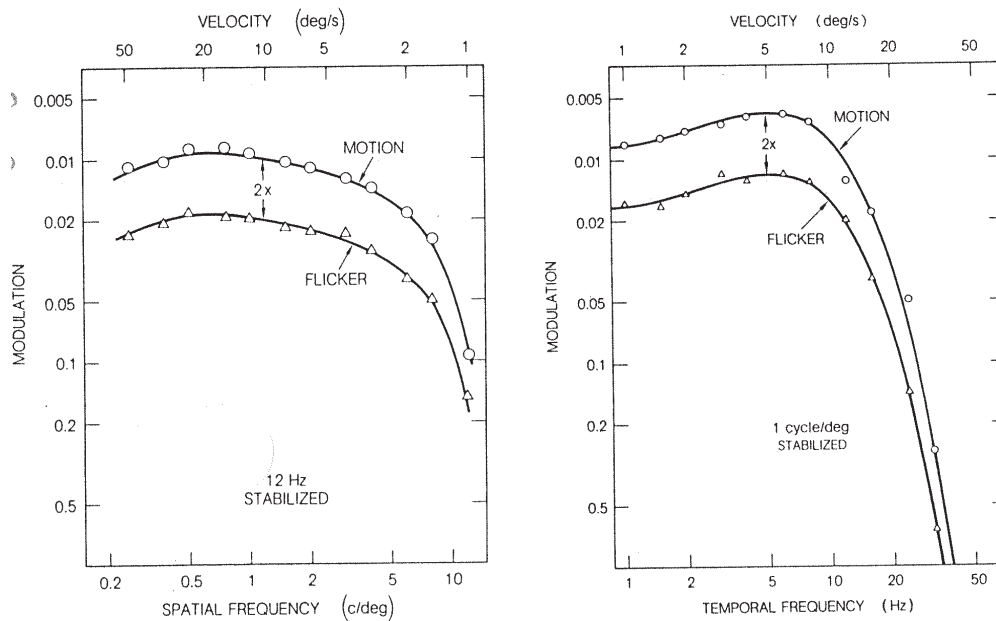


Figure 3.7 – Comparaison entre réseaux défilants et réseaux modulés dans le temps. A gauche : Mesures de sensibilité au contraste avec une fréquence temporelle de 12 Hz, soit dans le cas d'un réseau modulé (flicker), soit dans le cas d'une réseau défilant, avec une vitesse indiquée en haut du graphe. A droite : Même chose à fréquence spatiale fixée, en fonction de la fréquence temporelle. Abscisse : contraste limite. Attention, le sens de l'ordonnée est inversé. D'après Kelly [Kel79].

Cela signifie que formellement, un réseau papillotant peut être décomposé comme la somme de deux réseaux défilant dans deux directions opposées, de contraste moitié. Les Figs. 3.7 illustrent les expériences menées pour comparer les sensibilités dans ces deux cas.

On observe exactement un facteur de 2 entre la courbe de sensibilité au contraste d'un réseau défilant et celle d'un réseau papillotant avec une plus grande sensibilité pour le réseau défilant. Ceci est valable quelle que soit la fréquence spatiale ν ou la fréquence temporelle f .

On s'attend à ce résultat si

- Les réseaux défilants sont mieux adaptés au processus de vision que les réseaux papillotants. Le sujet détecte donc deux réseaux défilants de contraste moitié du réseau papillotant ; (Il faut alors ajuster le contraste au double de sa valeur pour le détecter au même niveau que le réseau défilant.)
- Les systèmes détecteurs du mouvement sont indépendants entre eux, au moins à faible luminance.

Mise en évidence de deux seuils différents dans les expériences de sensibilité au contraste

On présente au sujet un réseau défilant (f, ν) et on lui demande de déterminer le contraste limite nécessaire à la perception du réseau. Les sujets éprouvent alors la nécessité de définir deux seuils :

1. L'un concernant la détection de la structure spatiale du réseau,
2. L'autre concernant la détection du mouvement.

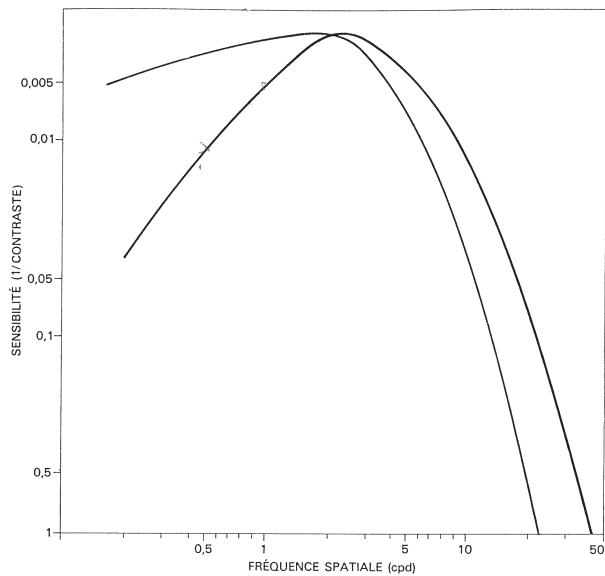


Figure 3.8 – Illustration des deux seuils de détection lors de l'observation d'un réseau défilant. Courbe de gauche : seuil de mouvement ; courbe de droite : seuil spatial. D'après Bonnet [Bonnet].

Les résultats concernant ces deux seuils sont illustrés sur la Fig. 3.8. On retiendra que :

- Aux fréquences spatiales ν élevées, la sensibilité aux fréquences spatiales est plus grande que la sensibilité au mouvement ;
- Aux faibles fréquences spatiales, l'effet est inverse.

Des mesures à fréquence temporelle f moyenne et fixée en fonction de la fréquence spatiale ν donnent des résultats tout à fait en accord (les courbes mouvement/spatial sont alors inversées).

Remarque : L'existence de ces deux seuils a été mise en évidence avec des réseaux défilants, les expériences faites sur les réseaux papillotants ne permettant pas de distinguer ces deux seuils.

Chapitre 4

L'espace visuel

4.1 Le champ visuel d'un point de vue géométrique

Il s'agit de déterminer l'étendue du champ visuel de chaque œil et leur chevauchement dans la vision binoculaire.

4.1.1 Quelques notions et définitions

Commençons par donner quelques définitions :

Champ de regard Ensemble de points de l'espace vus nettement par l'œil qui tourne dans son orbite en accommodant, la tête immobile. L'image de l'objet se produit dans la fovéa.

Champ visuel Ensemble du monde extérieur vu par l'œil, le regard restant fixé sur un point, la tête immobile.

Champ de vision Ensemble des champs visuels, pour toutes les directions de regard possibles.

4.1.2 Les coordonnées géométriques du champ visuel

Comme illustré sur la Fig. 4.1, on définit un système d'axes : le *méridien horizontal* MH et le *méridien vertical* MV. L'origine du système est F, impact de l'axe visuel sur le plan frontal. Un point courant P du champ visuel est repéré en coordonnées polaires. La norme de FP est calculée en utilisant un système de cercles concentriques gradués en degrés. On précise les choses en donnant une norme positive à P si il est au dessus de MH, négative sinon. Notons que l'angle est choisi généralement dans le sens des aiguilles d'une montre, de 0 à gauche à 180 à droite.

Le *champ visuel monoculaire* représenté sur la Fig. 4.2A est celui de l'œil droit. Les régions de non-vision sont en noir. Remarquer la projection de la tache aveugle, le champ visuel n'est pas circulaire du fait des ombres créées par le nez et les sourcils.

Le *champ visuel binoculaire* est également représenté. C'est l'intersection des deux champs monoculaires droit et gauche. (Fig. 4.2B)

Remarque : Un objet situé dans la région temporale aura son image projetée sur la rétine nasale, et vice versa.

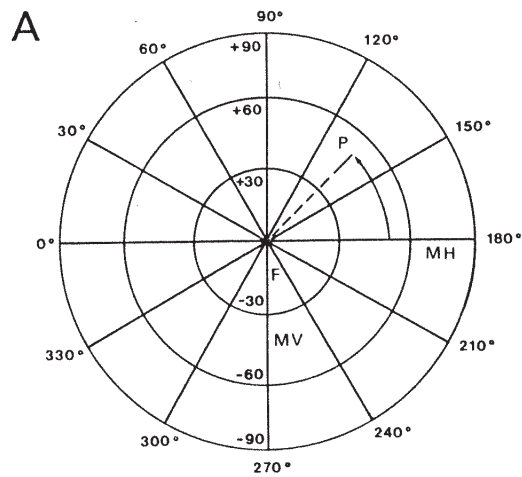


Figure 4.1 – Méthode de repérage d'un point P dans l'espace visuel. D'après Buser [Buser].

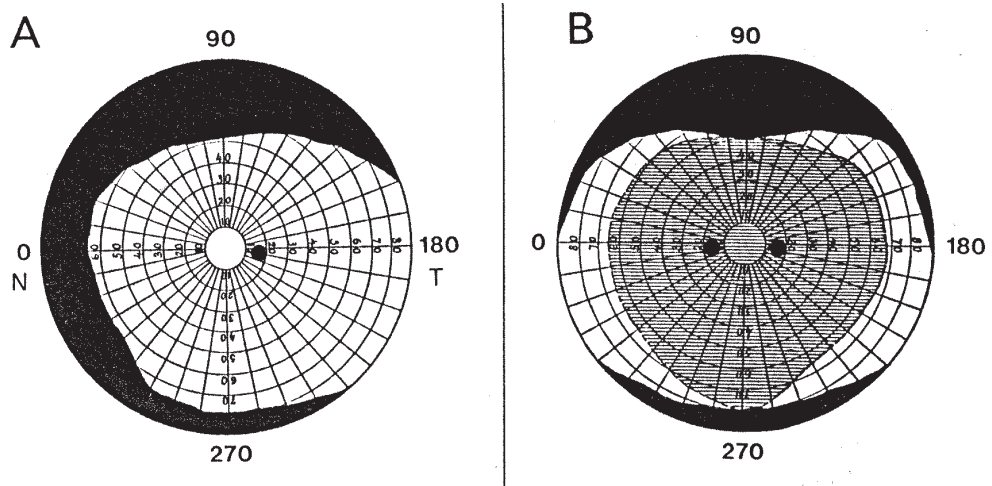


Figure 4.2 – Champs visuels monoculaire (A) et binoculaire (B) chez l'homme. D'après Buser [Buser].

4.2 Le processus de fusion

On pourrait penser que si deux yeux fixent le même point dans l'espace, l'impression sera celle de deux images dans deux directions différentes, car nous avons deux yeux. En fait, les deux images sur les deux rétines donneront bel et bien lieu à une seule et même perception.

4.2.1 Définition des points correspondants

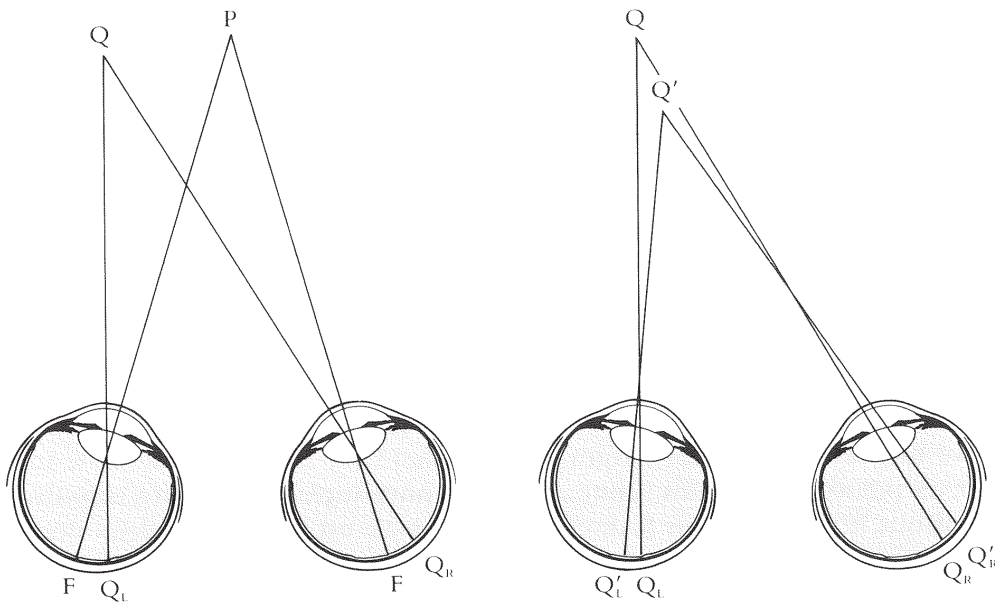


Figure 4.3 – Lorsqu'un observateur fixe un point P, les deux images de P se forment sur la fovéa. Quand le point Q est à la même distance de P, ses deux images Q(gauche) et Q(droit) forment deux points correspondants. La surface formée par tous les points Q est l'horoptère. D'après Hubel [Hubel].

Par définition, on appelle *points correspondants* deux points, l'un dans chaque rétine, dont l'excitation simultanée conduit à la sensation d'une source unique extérieure (*stéréopsie*). En principe, les points correspondants sont situés à égale distance de la fovéa (Fig 4.3).

Des points non correspondants sont dits *disparates*. Ils donnent lieu à deux sensations distinctes, c'est-à-dire à une *diplopie*.

4.2.2 Expérience-type de mise en évidence de la fusion

En un point F se trouve une tige verticale fixée par les deux yeux (l'image est donc sur la fovéa de chaque rétine). On positionne alors une seconde tige, séparée latéralement de la première. On fait varier sa distance, en prenant soin de la laisser toujours dans le même axe par rapport à l'œil gauche, par exemple.

Suivant la position de la tige, l'image sur la rétine de l'œil gauche va être identique ou différente de celle projetée sur l'œil gauche, qui ne change pas durant l'expérience. (Fig. 4.4)

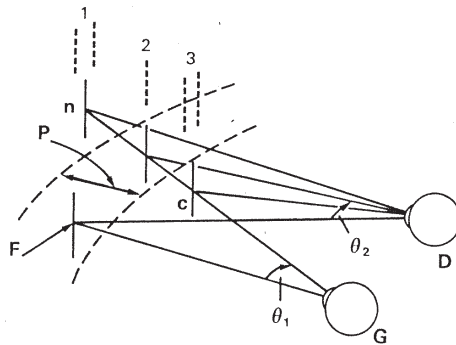


Figure 4.4 – Dessin, en perspective, du principe d'un dispositif qui permettrait la détermination de l'horoptère longitudinal chez l'homme. D'après Buser [Buser].

4.2.3 L'horoptère

a) Définition

L'*horoptère* est le lieu des points de l'espace dont les images se forment sur des points correspondants de la rétine. L'horoptère longitudinal est propre à chaque observation et dans le plan contenant la ligne inter-pupillaire et le point de fixation.

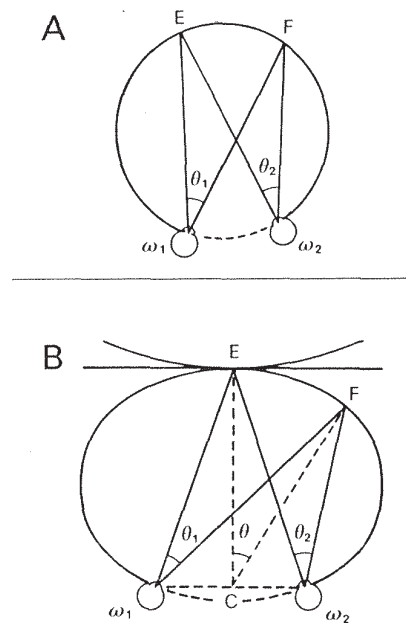


Figure 4.5 – Horoptères théorique (A) et réel (B). D'après Buser [Buser].

b) Définition mathématique

Mathématiquement, c'est le lieu des points dont les images se forment sur des points correspondants de la rétine. Si on fait l'hypothèse la plus simple selon laquelle les points correspondants des deux rétines, supposées identiques, constituent les images de couples de points (E, F) angulairement équidistants des deux yeux, la solution mathématique est un cercle passant par le centre des deux pupilles d'entrée et le point de fixation F. Dans ce cas, pour tout point E du cercle, $\theta_1 = \theta_2$. Il s'agit du *cercle de Vieth (1818)-Müller (1826)*, illustré sur la Fig. 4.5A.

c) L'horoptère longitudinal réel

La forme approchée de l'horoptère réel est obtenue à partir d'expérience du type de celle décrite précédemment. C'est la courbe moyenne obtenue dans la zone où la fusion a lieu. La courbe, illustrée sur la Fig. 4.5B, est symétrique par rapport au plan médian et tangente en F au cercle de Vieth-Müller.

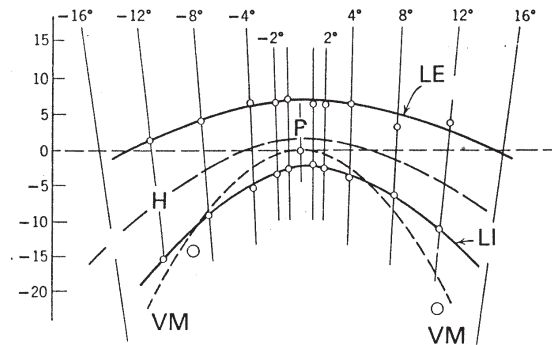


Figure 4.6 – Aire de Panum. D'après Buser [Buser].

Dans le plan horizontal ou dans son voisinage immédiat ($\pm 5^\circ$), l'horoptère n'est pas un cercle mais une cône décrite par l'équation

$$\cotg \theta_2 - \cotg \theta_1 = K, \quad (4.1)$$

où K est une constante et θ_1 et θ_2 sont des angles sous lequel l'un et l'autre œil voit le même segment EF. Aux petits angles, $\cotg \theta \simeq 1/\theta$ et l'équation s'écrit

$$\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1} = K, \quad (4.2)$$

avec $K \simeq 0.12$.¹

4.2.4 Diplopie et aire de Panum

L'expérience montre que la fusion est réalisée dans une certaine gamme de tolérance en profondeur qui décrit l'*aire de Panum*. On parle aussi d'aire de Panum rétinienne. Dans ce cas, pour un point d'une rétine, l'aire de panum est l'aire qui entoure le point correspondant, et qui permet à la fusion de se réaliser.

1. Dans le cas d'un cercle, cette relation serait valable même en dehors de l'approximation des petits angles et la constante K serait nulle.

La Fig. 4.6 est le résultat d'une mesure effectuée avec un point de fixation à 40 cm. Le cercle de Vieth-Müller est noté VM et l'horoptère réel est noté H. Les ordonnées ont été doublées, d'où l'effet d'étirement du cercle VM. L'aire de Panum est en outre davantage étirée en profondeur pour les grandes excentricités.

4.3 Vision du relief, appréciation des distances

4.3.1 Aspect qualitatif : une perception de profondeur relative

La perception stéréoscopique de la profondeur provient du fait que les deux yeux voient les objets dans l'espace à partir de positions légèrement différentes : l'utilisation simultanée des deux images rétiniennes permet la sensation de stéréopsie.

Remarque : la disparité rétinienne est horizontale (séparation horizontale des yeux).

La perception stéréoscopique ne permet qu'une évaluation relative de la profondeur. L'évaluation des distances absolues est obtenue par des facteurs secondaires relativement imprécis. Cf. plus loin dans le cours.

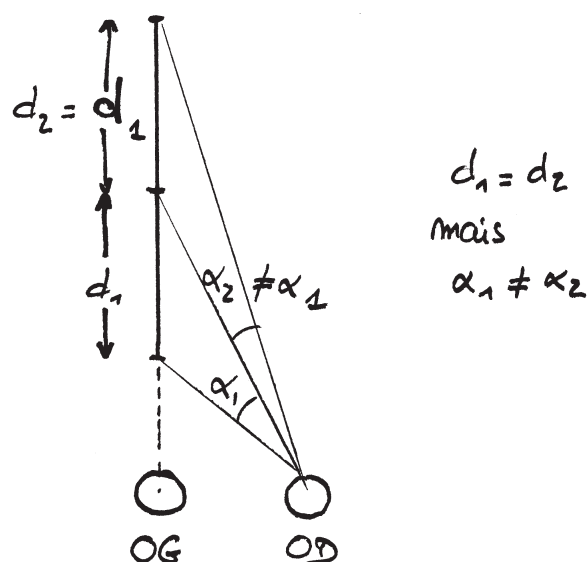


Figure 4.7 – Illustration de la perception relative des distances.

La Fig. 4.7 illustre cet effet. Pour simplifier, on suppose que la profondeur d'objet est dans l'axe de l'œil gauche. Suivant la distance absolue, l'œil droit percevra la profondeur sous un angle différent.

En fait, l'information recueillie est uniquement le rapport entre distance absolue et profondeur relative.

4.3.2 La stéréopsie : un module indépendant de perception

L'utilisation de stéréogrammes aléatoires a permis de montrer que *la perception de la disparité stéréoscopique est indépendante de toute autre perception*, notamment de la

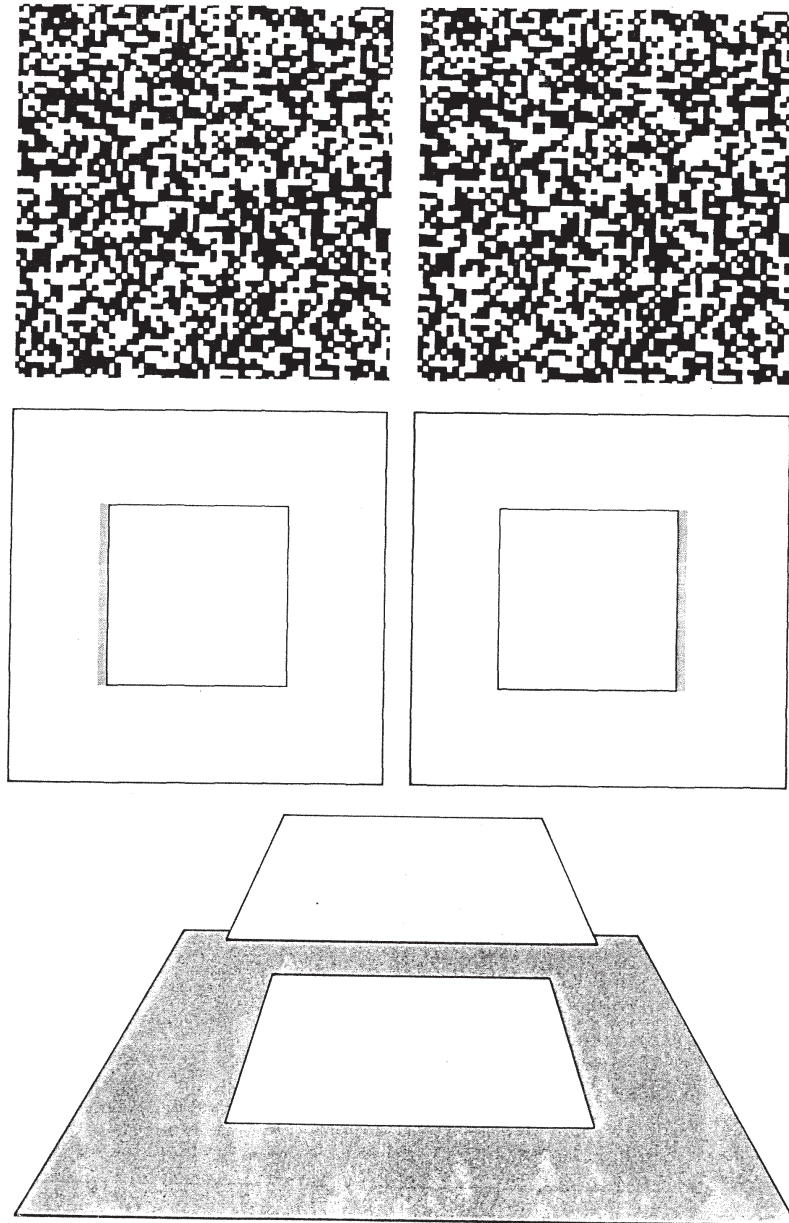


Figure 4.8 – Stéréogramme aléatoire. Une forte sensation de profondeur est obtenue lorsque le stéréogramme du haut est observée à travers un stéréoscope. D'après Poggio [Poggio].

reconnaissance des objets. [Poggio]

Cette propriété remarquable a été démontrée en utilisant des *stéréogrammes aléatoires*. Ce sont des paires de trames de points aléatoires mais qui recèlent une disparité systématique. Un exemple classique est représenté sur la Fig. 4.8. On réalise une trame serrée de points noirs et blancs répartis aléatoirement, on duplique la trame. Sur l'une des copies on déplace une partie du motif, un carré sur l'exemple, les vides sont comblés par la même trame aléatoire. Le carré est déplacé dans l'autre direction sur l'autre trame. On a alors la sensation visuelle que ce carré est placé devant un fond uni.

4.4 Aspect quantitatif

4.4.1 Parallaxe stéréoscopique

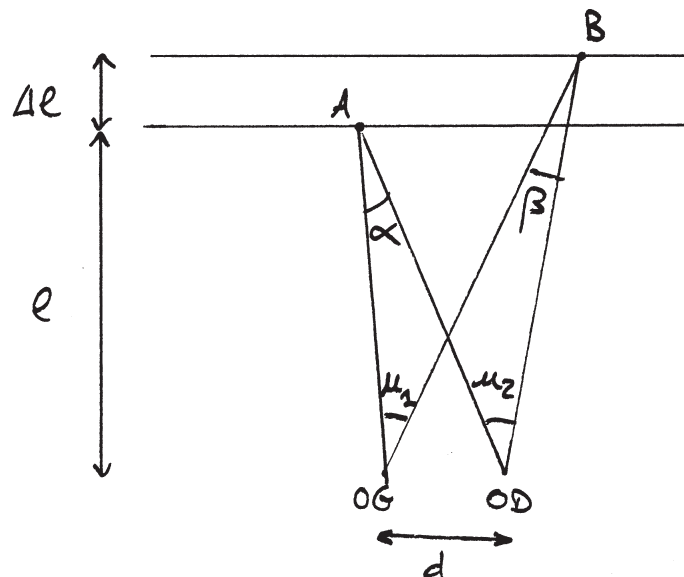


Figure 4.9 – Illustration de la parallaxe stéréoscopique.

A et B sont deux points voisins du plan médian et situés à des distances peu différentes ℓ et $\ell + \Delta\ell$ de l'observateur, comme illustré sur la Fig. 4.9. L'œil gauche voit [AB] sous l'angle u_1 . L'œil droit voit [AB] sous l'angle u_2 . α et β sont les angles de convergence, le sujet fixant alternativement A et B. La distance entre les deux yeux vaut d . On se place dans les conditions où u_1 et u_2 sont très différents.

Remarque. Le sujet positionne donc tantôt l'horoptère sur A, tantôt sur B.

On appelle *parallaxe stéréoscopique* ou *disparité rétinienne binoculaire horizontale* la différence

$$u_2 - u_1 = \alpha - \beta.$$

Or,

$$\alpha - \beta = \frac{d}{\ell} - \frac{d}{\ell + \Delta\ell} = \frac{d}{\ell} \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta\ell}{\ell}} \right],$$

ce qui donne² pour $\Delta\ell \ll \ell$,

$$\alpha - \beta \simeq \frac{d\Delta\ell}{\ell^2}.$$

On vérifie que l'on n'a accès qu'à une mesure relative de la distance. En effet, $\alpha - \beta$ est fonction de ℓ et $\Delta\ell$, donc la connaissance de $\alpha - \beta$ ne permet pas de les déterminer la distance à chaque objet. Pour un point de fixation donné, ℓ fixé, on pourra classer en profondeur relative plusieurs objets.

4.4.2 Le cinéma en 3D

Le cinéma 3D exploite un dispositif technique³ permettant de projeter sur chaque œil des images d'une scène contenant une disparité rétinienne. Les images différentes sont obtenues, soit au moment de la capture avec une caméra à deux objectifs et deux capteurs séparés horizontalement, soit par calcul, en exploitant les formules vues précédemment.

Quelle que soit la solution technique adoptée, le rendu n'est pas conforme à la perception d'une véritable scène tridimensionnelle. En effet, au cinéma, l'accommodation se fait à l'infini, alors que dans la réalité, les objets proches nécessitent, outre la convergence des yeux, un effort de focalisation. Par conséquent, l'expérience de cinéma 3D doit être de durée limitée, pour ne pas engendrer des problèmes de vision.

4.4.3 Acuité stéréoscopique

Définition : On appelle *acuité stéréoscopique* l'inverse du seuil juste perceptible de la parallaxe stéréoscopique exprimée en minutes d'arc.

Ordre de grandeur : Dans des conditions optimales, on peut détecter une parallaxe de 12 secondes d'arc, ce qui correspond à une acuité stéréoscopique de 5. A 1 m de distance pour une distance interpupillaire d de 63 mm on trouve une profondeur minimale inférieure au millimètre.

4.4.4 Théories de l'acuité stéréoscopique

Dans l'état actuel des connaissances, on fait intervenir deux interprétations complémentaires. La perception stéréoscopique est due

- soit à une perception directe de la disparité rétinienne (donc sensibilité à $u_2 - u_1$, effet statique)
- soit à des mouvements fins des yeux, modifiant les convergences (donc sensibilité à $\alpha - \beta$, effet dynamique)

A noter que les mouvements des yeux sont cruciaux, car en modifiant sans cesse le point de fixation, ils modifient en permanence l'aire de Panum et permettent ainsi une vision stéréoscopique dans une grande plage de profondeur. Ils permettent également d'optimiser la perception lorsque la durée d'observation s'allonge.

2. On utilise la relation $(1 + \epsilon)^n \simeq 1 + n\epsilon$, valable lorsque $\epsilon \ll 1$

3. Auto-stéréoscopie (Nintendo 3DS, écrans TV, etc.), lunettes actives (affichage séquentiel gauche/droite), lunettes passives (sélection par la polarisation de la lumière), etc.

4.4.5 Seuil de vision binoculaire

Nous nous intéressons ici à la faculté de détection, et non plus à l'espace visuel. Nous allons utiliser notre connaissance du seuil de vision monoculaire pour étudier comment ce seuil est modifié en vision binoculaire. Tout d'abord quelques faits expérimentaux :

1. Le seuil absolu de vision binoculaire est légèrement plus faible que celui monoculaire, mais pas d'un facteur 2.
2. Au seuil de vision, le sujet est incapable de dire s'il a vu la lumière avec un seul œil ou avec les deux.

En effet, le sujet déclarera "non vu" lorsqu'aucun des deux yeux n'aura été stimulé. Dès qu'un des deux yeux sera stimulé, il déclarera le contraire.

Ceci peut se vérifier grâce à un calcul simple de probabilités. Considérons comme seuil de luminance en vision monoculaire une probabilité de 50 % qu'elle ne soit pas vue. Si on utilise les yeux complètement indépendants, la probabilité qu'elle ne soit pas vue est $0,5 \times 0,5 = 0,25$. On pourrait aussi calculer la probabilité de voir au moins d'un œil, il faudrait alors sommer les 3 combinaisons possibles, chacune d'elle ayant une probabilité de 0,25. *La probabilité d'avoir un œil illuminé est donc plus grande lorsque le sujet utilise deux yeux.*

4.5 Facteurs monoculaires de perception du relief et d'appréciation des distances

La stéréopsie est essentiellement binoculaire. Cependant, il est important de savoir si la vision monoculaire permet la vision du relief. Il faut de plus trouver des facteurs monoculaires d'appréciation des distances.

4.5.1 La parallaxe monoculaire

C'est celui qui semble le plus important (en tout cas dont nous avons probablement le plus conscience, ce qui le rend indiscutable).

Observateur en mouvement

Lorsqu'un observateur se déplace à vitesse constant devant une scène tridimensionnelle, on change le référentiel, et tout se passe comme si l'observateur était immobile, devant une scène en mouvement. Dans ce cas, tous les points de la scène ont la même vitesse linéaire, mais leur déplacement angulaire sur la rétine dépendra inversement de leur distance à l'œil. C'est le fameux effet du paysage qui défile par la fenêtre du train, alors que la lune semble accompagner le train.

On suppose un objet en translation dans un plan frontal, comme illustré sur la Fig. 4.10. Comme le point A est supposé distant de l'observateur d'une distance ℓ , tandis que le point B se trouve à une distance $\ell + \Delta\ell$. Au bout d'un faible interval de temps, B se retrouve en B' et A en A'. Si B s'est déplacé angulairement de θ , on a

$$BB' = (\ell + \Delta\ell)\theta.$$

De la même façon,

$$AA' = \ell(\theta + \Delta\theta).$$

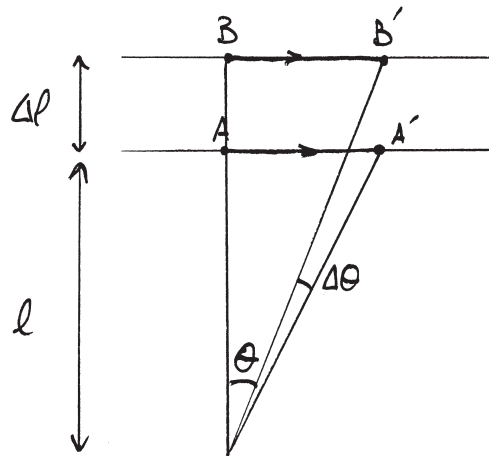


Figure 4.10 – Illustration de la parallaxe monoculaire.

Comme tous les points se déplacent avec la même vitesse linéaire, il est clair que $AA' = BB'$. D'où

$$l(\theta + \Delta\theta) = (l + \Delta l)\theta,$$

soit

$$\Delta\theta = \theta \frac{\Delta l}{l}.$$

La vitesse angulaire de parallaxe, variation au cours du temps de la parallaxe vaut

$$\frac{d(\Delta\theta)}{dt} = \frac{\Delta l}{l} \frac{d\theta}{dt}.$$

L'œil est capable de détecter une vitesse angulaire de parallaxe de $40''/\text{sec}$

Objet stationnaire et tête en mouvement

Si les mouvements dans l'orbite ne semblent pas très utiles au repérage spatial, les mouvements de la tête le sont.

4.5.2 L'accommodation

L'effet de convergence, ou contraction des muscles ciliaires peut permettre d'estimer les distances absolues et la profondeurs.

Les distances absolues

En 1991, une étude a été publiée dans le magazine *Nature*. On manipule la vergence de l'œil à l'aide de miroirs d'une stéréoscope pour simuler une distance variable. Il est apparu que la vergence influe la distance perçue mais ne permet pas de donner une estimation précise.

La profondeur

L'influence de la vergence sur l'appréciation de la profondeur n'a été vérifiée précisément que sur des distances courtes inférieures à deux mètres.

4.5.3 Autres facteurs

Ils sont loin d'être négligeables dans la pratique, mais présentent peu d'intérêt d'un point de vue physiologique :

- reconnaissance : la taille de l'objet est connue (arbre, personne, animal ;
- interposition : les objets se cachent partiellement ;
- reflets, ombres
- convergence de ligne dont on sait qu'elles sont parallèles
- diffusion atmosphérique : les particules en suspension dans l'atmosphère absorbent et réémettent uniformément la lumière émise par les objets lointains, donc un voile diffuse s'interpose, rendant les couleurs plus pastels à mesure qu'on s'éloigne. (Illusion de montagnes rapprochées après un orage)

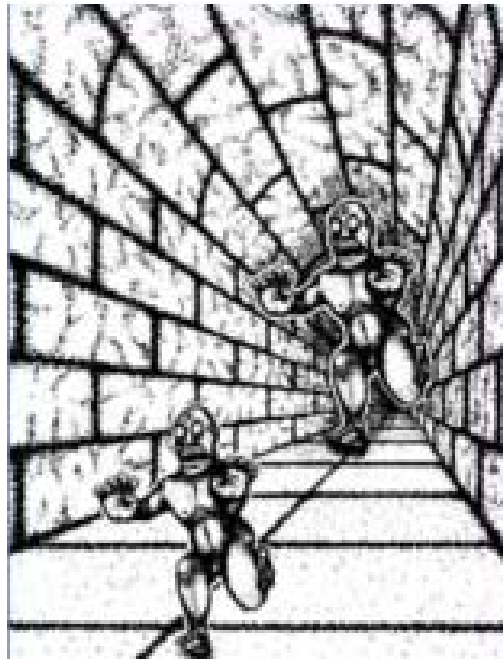


Figure 4.11 – Convergence des lignes...

4.5.4 Principe de non-contradiction

Perception monoculaire et binoculaire interviennent pour restituer le relief d'une scène. Toute contradiction existant entre les divers moyens d'appréciation des distances relatives gêne la perception du relief. Celui-ci est alors quand même perçu parfois mais souvent au prix d'une grande fatigue visuelle et d'un désagrément certain.

Bibliographie

- [Bonnet] C. Bonnet, *La perception visuelle du mouvement*, Bibliothèque Pour la Science (Belin, Paris, 1984), chapitre 2, p. 101.
- [Buser] P. Buser et M. Imbert, *Vision* (Hermann, Paris, France, 1987).
- [Gregory] R. L. Gregory, *L'œil et le cerveau*, Neurosciences & cognition (De Boeck, Paris, France, 2000).
- [Hubel] D. Hubel, *L'œil, le cerveau et la vision*, L'univers des sciences (Belin, Paris, France, 1994).
- [Hub59] D. J. Hubel et T. N. Wiesel, « Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex », *Journal of Physiology*, vol. 148 (1959) p. 574–591.
- [Kel79] D. H. Kelly, « Motion and vision II. Stabilized spatio-temporal threshold surface », *Journal of the Optical Society of America*, vol. 69 (1979) p. 1340–1349.
- [Kel85] D. H. Kelly, « Visual processing of moving stimuli », *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 2 (1985) p. 216–225.
- [WV] H. Kolb, E. Fernandez et R. Nelson, « Webvision : the organization of the Retina and visual system », <http://webvision.med.utah.edu>.
- [Pirenne] M. H. Pirenne, *L'œil et la vision* (Gauthier-Villars, Paris, France, 1972).
- [Poggio] T. Poggio, *Vision humaine et vision par ordinateur*, Bibliothèque Pour la Science (Belin, Paris, 1984), chapitre 3, p. 144.
- [Rob66] J. G. Robson, « Spatial and temporal contrast sensitivity functions of the visual system », *Journal of the Optical Society of America*, vol. 56 (1966) p. 1141–1142.
- [Rodieck] R. W. Rodieck, *La vision*, Neurosciences & cognition (De Boeck, Paris, France, 2003).

Index

- éclairage rétinien, 4
- accommodation, 53
- acuité de détection, 8
- acuité de reconnaissance, 8
- acuité stéréoscopique, 49
- acuité visuelle, 7
- adaptation, 13
- aire de Panum, 47
- appréciation des distances, 52
- Arnulf, 10
- Bloch, 29
- canaux spatiaux, 21
- cellules bipolaires, 17
- cellules ganglionnaires, 17
- cellules latérales, 17
- cercle de Vieth-Müller, 46
- champ de regard, 43
- champ de vision, 43
- champ visuel, 43
- champ visuel binoculaire, 43
- champ visuel monoculaire, 43
- champs récepteurs, 19
- contraste, 14
- contraste simultané, 13
- contraste temporel, 29
- correspondants (points), 45
- couleur, 12
- défilant (réseau), 37
- diamètre pupillaire, 10
- diplopie, 45
- disparates (points), 45
- disparité rétinienne binoculaire horizontale, 49
- excentricité, 12
- fréquence critique de fusion, 31
- fréquence spatiale, 14
- fréquence temporelle, 30
- Hecht, 25
- Hermann, 20
- Hooke, 7
- horoptère, 46
- illusion de Hermann, 20
- Leibowitz, 10
- loi de Bloch, 29
- loi de Talbot-Plateau, 31
- luminance, 4
- luminance de fond, 12
- méthode des marches d'escalier, 16
- mesure de l'acuité, 8
- Monoyer, 8
- motif, 14
- neurones bipolaires, 17
- neurones ganglionnaires, 17
- non-contradiction (principe de), 54
- optotype, 8
- période, 14
- Panum, 47
- papillotant (réseau), 34
- parallaxe monoculaire, 52
- parallaxe stéréoscopique, 49
- photons, 27
- photorécepteur, 17
- Plateau, 31
- quanta de lumière, 27
- réseaux spatiaux, 14
- rétine, 17
- réseau défilant, 37
- réseau papillotant, 34

INDEX

seuil absolu de détection, 25
seuil de vitesse, 33
Snellen, 8
stéréogramme aléatoire, 49
stéréopsie, 45

Talbot, 31
troland, 4

Vieth-Müller, 46
vitesse (seuil de), 33