

Vision et visualisation

P. Denieul, H. Brettel, A. Monot et F. Vienot

*CNRS UPR 257, Laboratoire de Physique Appliquée du Muséum, 43 rue Cuvier,
F-75005 Paris, France*

I. INTRODUCTION

Le système optique de l'oeil forme, au niveau de la rétine, une image du monde extérieur qui est analysée par le cerveau. Cette image rétinienne, constituée d'une distribution bidimensionnelle et multivariable de lumière, est transformée en un signal neuronal par la mosaïque des photorécepteurs; ce signal subit d'abord un prétraitement au niveau rétinien puis est transmis au cerveau où des opérations plus complexes de traitement sont effectuées pour extraire les attributs sensoriels de la scène visuelle.

Les progrès récents en neurophysiologie du système visuel et dans la formalisation du traitement visuel de l'image, notamment par l'analyse de Fourier, permettent de mieux comprendre les opérations d'analyse d'image assurant à l'homme la saisie de l'information visuelle et d'aller plus avant vers une modélisation quantitative des fonctions visuelles. En dehors de leur intérêt pour la recherche fondamentale, ces travaux ont des implications très importantes dans le domaine de la visualisation et, plus généralement, dans toutes les techniques concernant l'acquisition de l'image, son traitement, sa transmission et son affichage.

Dans ce qui suit, les caractéristiques de la vision humaine pour le traitement de l'information spatiale, temporelle, spatio-temporelle, colorée et tridimensionnelle, seront examinées en leur associant les applications au niveau des techniques de visualisation.

II. QUALITE ET REGULATION DE L'IMAGE RETINIENNE

L'oeil peut être assimilé à un appareil de prise de vue. La pupille et la rétine constituent respectivement le diaphragme d'ouverture et la surface photosensible. Le système optique, que l'on peut assimiler en première approximation à un système centré, est constitué de la cornée transparente qui assure les deux tiers de la convergence des rayons lumineux et du cristallin qui est une lentille déformable placée entre deux milieux transparents. Le cristallin complète le rôle de la cornée et assure la mise au point de l'image optique; ce phénomène constitue l'accommodation (Fig 1a).

La répartition des éclaircissements dans l'image rétinienne (stimulus rétinien) peut être affectée par des défauts de mise au point dus, soit à l'imprécision de l'accommodation, soit à des défauts de conformation de l'oeil appelés amétropies. Un oeil emmétrope voit net les objets lointains sans accommoder tandis qu'un oeil amétrope voit flou ces objets (cas du myope) ou doit accommoder pour les voir nets (cas de l'hyperope). L'astigmatisme, résultant d'une asymétrie des surfaces, modifie aussi l'image rétinienne de manière très sensible.

Même quand l'image optique est focalisée sur la rétine et en supposant un stigmatisme rigoureux, l'image d'un point, appelée aussi réponse percussionnelle, est élargie en raison de la nature ondulatoire de la lumière et correspond à une tache de diffraction ou disque d'Airy. De plus, les aberrations, les défauts irréguliers des milieux oculaires et la diffusion intraoculaire provoquent un élargissement de cette réponse percussionnelle; celle-ci, mesurée par méthode ophtalmoscopique, permet ainsi de caractériser globalement le système optique de l'oeil. Grâce à la théorie des systèmes, il est aussi possible de considérer le système optique de l'oeil comme

un filtre de fréquences spatiales. Sa fonction de transfert peut être obtenue directement en utilisant des réseaux à profil de luminance sinusoïdale caractérisés par leur fréquence spatiale $1/p$ (p : pas du réseau) et leur modulation M :

$$M = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min})$$

On étudie alors l'atténuation de la modulation due à l'optique de l'oeil en fonction de la fréquence spatiale. La courbe de filtrage peut aussi être obtenue par transformation de Fourier de la réponse percussionnelle.

Les résultats montrent que la qualité optique, pour un point sur l'axe, dépend étroitement du diamètre pupillaire (d); définie par la diffraction pour des très petites pupilles ($d < 1\text{mm}$), la qualité est limitée par les aberrations et la diffusion pour les grandes pupilles ($d > 4\text{mm}$). La qualité optimale est observée pour des pupilles intermédiaires ($d = 2$ à 3mm). La fréquence spatiale de coupure correspondante varie entre 30 et 60 cycles par degré (cpd) (Fig 2) (1, 2, 3, 4).

La qualité de l'image rétinienne dépend principalement de la précision du mécanisme accommodatif qui se déclenche lorsque la défocalisation a dépassé la profondeur de champ. En optométrie clinique, l'amplitude d'accommodation, dont la valeur est voisine de la variation de puissance dioptrique (vergence) du cristallin, caractérise l'effort musculaire. Lorsqu'intervient la presbytie, c'est-à-dire, une baisse sensible de l'amplitude d'accommodation maximale avec l'âge, cet effort peut être réduit à l'aide d'une optique (addition en vision de près).

La précision de l'accommodation, caractérisée par l'écart entre le test observé et le conjugué optique de la rétine, dépend de nombreux facteurs, notamment de la qualité optique de l'oeil et de la qualité du test. La profondeur de champ est utilisée par le mécanisme pour réaliser un compromis entre la réponse idéale et une position de repos vers laquelle l'accommodation tend naturellement (5, 6). En fait la qualité optique de l'oeil est le résultat d'un asservissement permanent de l'image rétinienne par l'accommodation sous le contrôle des centres nerveux supérieurs; ce dynamisme s'observe objectivement au niveau des oscillations continues de vergence du cristallin (microfluctuations d'accommodation) (7).

III. SENSIBILITE A LA LUMIERE ET ADAPTATION

1. Anatomie de l'oeil.

La rétine constitue une interface entre l'image optique et le système nerveux dont elle est partie intégrante. Elle est formée de neurones spécialisés qui sont interconnectés. La lumière atteint la couche des photorécepteurs qui est la plus profonde. Ces photorécepteurs, qui contiennent des pigments photosensibles, sont de deux types : les cônes pointus responsables de la vision diurne ou photopique et de la vision des couleurs, et les bâtonnets adaptés à la vision de nuit ou scotopique. L'influx nerveux, issu des photorécepteurs, est ensuite conduit par les cellules bipolaires et ganglionnaires vers les fibres du nerf optique. Il existe aussi une structure transversale très importante qui réalise les interactions latérales (cellules horizontales et amacrines) (Fig 1b).

La rétine effectue une compression des signaux : elle contient 130 millions de récepteurs mais ne dispose que d'environ 1 million de fibres dans le nerf optique (8). Cette compression est réalisée en particulier grâce à une différenciation zonale de la rétine. Seule une zone, d'un diamètre angulaire d'environ 1 degré, située au fond d'une dépression appelée fovéa, assure la vision des détails. On n'y rencontre que des cônes très effilés, chacun étant relié en ligne directe à une fibre du nerf optique. Par contre, en périphérie, plusieurs récepteurs sont connectés à une même fibre. Cette compression est aussi obtenue grâce à un prétraitement des signaux, issus des photorécepteurs, par le réseau des autres neurones de la rétine. En sortie des cellules ganglionnaires, l'information est ensuite véhiculée sous forme de trains d'impulsions au cortex visuel le long du nerf optique avec croisement partiel des fibres au niveau du chiasma et relais au corps genouillé.

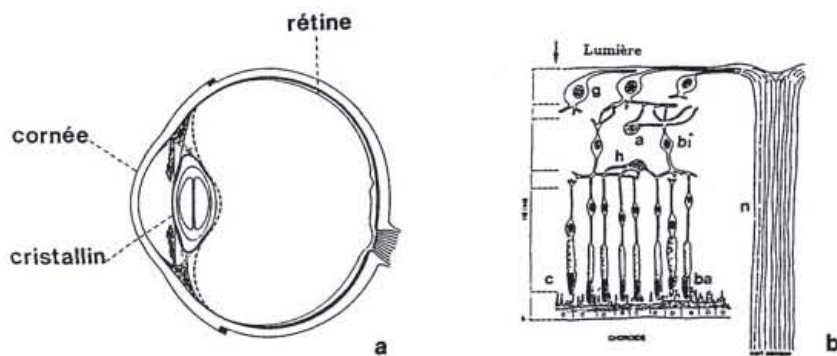


Fig.1. Anatomie de l'oeil : a) coupe schématique de l'oeil; b) coupe de la rétine : cône (c), bâtonnet (ba), bipolaire (bi), ganglionnaire (g), amacrine (a), horizontale (h), nerf optique (n) (d'après Dowling et Boycott, 1966).

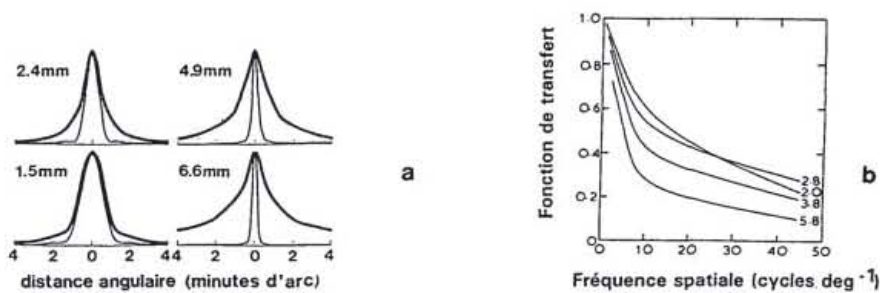


Fig.2. Qualité optique de l'oeil en fonction du diamètre pupillaire : a) Image rétinienne d'un point, profil réel (—) et profil de diffraction (---) (d'après Campbell et Gubisch, 1966); b) Fonction de transfert de modulation (d'après Campbell et Green, 1965).

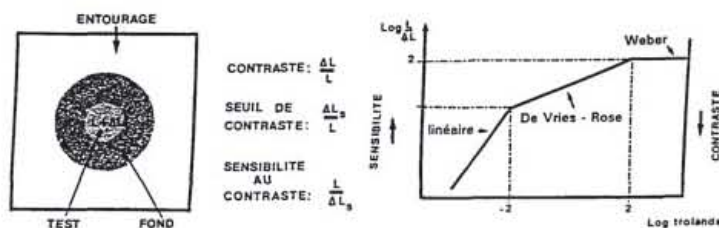


Fig.3. Sensibilité différentielle en fonction du niveau d'adaptation lumineux.

2. Sensibilité à la lumière-Photométrie.

Au niveau de la stimulation, on caractérise physiquement un rayonnement visible par sa répartition spectrale et son flux énergétique; différentes grandeurs radiométriques permettent de tenir compte des conditions géométriques de propagation de cette énergie.

L'oeil est un détecteur dont la sensibilité est liée à la probabilité pour un photon d'être absorbé. Sans avoir eu à mesurer la sensation lumineuse qui constitue le signal de sortie, on a défini, pour un observateur standard, la fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale V_λ qui permet de comparer l'effet visuel relatif des diverses radiations du spectre. Cette fonction établit le lien entre les grandeurs radiométriques et un ensemble de grandeurs parallèles permettant de caractériser les rayonnements par leur effet visuel et qui font l'objet de la photométrie. Le maximum d'efficacité relative spectrale se situe à 555 nm : $V_\lambda(555 \text{ nm})=1$. La grandeur photométrique la plus utilisée pour quantifier la sensation lumineuse est la luminance visuelle L_v à laquelle correspond la luminance énergétique L_e (ou radiance). Pour un rayonnement complexe, les luminances composantes s'additionnent selon la formule :

$$L_v = K_m \int V_\lambda (dL_e / d\lambda) d\lambda$$

où $dL_e/d\lambda$ représente la densité spectrale de radiance et $K_m=683 \text{ lm/W}$. Les grandeurs photométriques ont des unités qui dérivent de l'unité d'intensité lumineuse appelée candéla. La définition de la candéla permet de réaliser des mesures photométriques sur des bases purement physiques. On trouve le lumen (lm) pour le flux lumineux, la candéla par m^2 (cd/m^2) pour la luminance (lumineuse) ou luminance visuelle et le lux (lx) pour l'éclairement lumineux (l'adjectif lumineux est souvent omis) (9).

Pour traduire le niveau d'adaptation d'un oeil, la grandeur la plus appropriée est l'éclairement rétinien. L'éclairement étant proportionnel au produit de la luminance L et de l'aire pupillaire S , cette quantité LS définit un niveau rétinien (10) dont l'unité est le Troland (Td); un troland correspond au niveau rétinien produit par une luminance de $1 \text{ cd}/\text{m}^2$ à travers une pupille de 1 mm^2 . Dans les conditions naturelles de vision, le diamètre pupillaire limitant le flux incident dépend de manière connue de la luminance; il est alors possible de caractériser le niveau d'adaptation soit, par le niveau rétinien E , soit par la luminance L .

On distingue trois domaines d'adaptation lumineuse pour l'oeil : le domaine photopique correspondant à la vision de jour où seuls les cônes sont actifs ($E>30 \text{ Td}$ ou $L>3 \text{ cd}/\text{m}^2$), le domaine scotopique correspondant à la vision de nuit où seuls les bâtonnets fonctionnent ($E<0.04 \text{ Td}$ ou $L<0.001 \text{ cd}/\text{m}^2$) et le domaine mésopique, ou intermédiaire, pour lequel les deux types de récepteurs fonctionnent.

3. Sensibilité différentielle

La psychophysique, qui étudie les relations entre les mesures physiques des stimuli et la sensation visuelle, s'est beaucoup intéressée à la mesure des seuils de perception pour en déduire les sensibilités correspondantes (inverse du seuil). On distingue deux types de sensibilité : absolue et différentielle.

La sensibilité absolue de l'oeil, qui consiste à déterminer, dans l'obscurité, le plus faible stimulus susceptible de provoquer une sensation, correspond à environ 2 à 5 photons (10). Cette caractéristique intervient peu pour la visualisation.

La sensibilité différentielle consiste à mesurer, pour chaque niveau de luminance d'adaptation, l'incrément de luminance ΔL juste discernable sur le fond de luminance d'adaptation L ; c'est une caractéristique fondamentale du système visuel. Elle est définie par $L/\Delta L$ et correspond à l'inverse du contraste (Fig 3). Dans l'évolution de la sensibilité différentielle avec le niveau d'adaptation, partant du seuil absolu, trois phases se succèdent : la première phase correspond à un incrément ΔL qui reste constant; la deuxième phase, intermédiaire, est associée à la loi de De Vries-Rose où la sensibilité est proportionnelle à $L^{1/2}$ et s'apparente au rapport signal/bruit d'un photodétecteur limité par les fluctuations quantiques; la troisième phase correspond à la loi

de Weber pour laquelle la sensibilité est constante quel que soit le niveau d'adaptation (valeur moyenne : $L/\Delta L=100$ à 200).

La loi de Weber, très générale en psychophysique, permet d'expliquer l'invariance d'aspect des objets naturels dont le contraste physique est constant malgré des changements de niveau d'éclairage parfois considérables. Bien que des écarts à cette loi existent, il est possible d'estimer approximativement le nombre maximum d'échelons de luminance discernables entre deux niveaux de luminance. Ainsi entre 1 et 100 cd/m^2 , on dénombre environ 300 échelons (10). Un tel résultat est applicable à la quantification des niveaux lumineux pour les dispositifs de visualisation.

IV. CARACTERISTIQUES SPATIALES DU SYSTEME VISUEL

1. Courbe de sensibilité au contraste.

L'étude des caractéristiques spatiales du système visuel s'est longtemps limitée à la mesure de l'acuité et de la sensibilité différentielle $L/\Delta L$ examinée précédemment. Traditionnellement, l'acuité est mesurée par l'inverse de la dimension angulaire minimale du détail critique, requise pour la reconnaissance d'un test (seuil moyen de 0.7 min d'arc correspondant à une acuité moyenne de 1.4 min^{-1} ou 14/10); elle n'est cependant souvent définie que pour un contraste unitaire; de même la sensibilité différentielle n'est souvent spécifiée que pour une taille donnée du test.

Pour tenir compte des interactions entre la taille et le contraste du test, les expérimentateurs ont étendu les techniques empruntées à la théorie des systèmes à tout le système visuel (optique et étapes neuronales) (11). Les tests sont constitués de réseaux à profil de luminance sinusoïdal définis précédemment (partie II). En demandant à l'observateur d'ajuster, pour chaque fréquence spatiale $1/p$, le contraste des réseaux au seuil de détection (M_s), on obtient une courbe dite de sensibilité au contraste ($1/M_s$) qui présente une forme passe-bande avec un maximum de sensibilité de 100 à 500 (cf la loi de Weber) situé entre 3 et 5 cpd. La fréquence de coupure qui représente la limite de résolution pour des réseaux de contraste unitaire est de l'ordre de 30 à 60 cpd, ce qui représente un détail élémentaire résolu de l'ordre de 0.5 à 1 min d'arc correspondant à l'acuité (Fig 4).

L'atténuation de la sensibilité, observée pour les hautes fréquences spatiales, est interprétée par l'intervention de la qualité de l'image optique examinée précédemment et de la mosaïque des photorécepteurs qui échantillonnent cette image. Dans la fovéa, l'espacement des cônes, qui sont les seuls récepteurs à intervenir, est de l'ordre de 10^{-2} degré et correspond à l'échantillonnage optimal si l'on considère une fréquence de coupure de 50 cpd pour le système optique; cependant, dans la pratique, en raison des défauts optiques et des défauts de focalisation, c'est l'image qui limite la sensibilité. Par contre, en périphérie, l'image optique est sous-échantillonnée et c'est l'espacement des récepteurs qui conditionne la coupure.

L'interprétation de l'atténuation au niveau des basses fréquences n'est pas aussi immédiate. Dans l'hypothèse d'un processus linéaire, la courbe de sensibilité au contraste est considérée comme une mesure de la fonction de transfert de modulation du mécanisme visuel (système optique et mécanismes neuronaux en cascade). La réponse percussionnelle présente l'allure d'un chapeau mexicain; elle a été modélisée par le laplacien d'une gaussienne (12) ou la différence de deux gaussiennes (13) (Fig 5). La largeur du pic central conditionne la limite vers les hautes fréquences; par contre, la partie périphérique, correspondant à une réponse opposée, est interprétée comme une inhibition latérale, due à des facteurs nerveux, qui expliquerait l'atténuation aux basses fréquences. Chez l'animal, l'étude électrophysiologique des cellules ganglionnaires dans la rétine montre, qu'en effet, les points du champ visuel qui provoquent une réponse de la cellule (champ récepteur) se répartissent en deux zones : une zone centrale excitatrice et une zone annulaire inhibitrice, cette inhibition latérale étant liée à la circuiterie rétinienne.

Ainsi, dès le niveau rétinien, le système visuel réalise une compression de l'information en privilégiant la transmission des contrastes locaux aux dépens des variations basses fréquences spatiales de luminance. Ce type de filtrage, qui permet une description globale des caractéristiques spatiales du système visuel, est important à considérer pour les dispositifs de visualisation. L'oeil intervenant en bout de chaîne, les bandes passantes du dispositif doivent être compatibles avec les bandes passantes du système visuel. Cette fonction permet de définir des critères de visibilité à la fois pour le signal utile et le signal parasite.

En dehors de l'influence des paramètres déjà étudiés (optique, accommodation, rétine) (14), la courbe de sensibilité au contraste dépend du niveau d'adaptation de l'oeil. En effet, la courbe est passe-bas pour les bas niveaux lumineux alors qu'elle est définitivement passe-bande aux niveaux plus élevés avec décalage du maximum vers les hautes fréquences et augmentation globale de la sensibilité. Le changement de sensibilité, très notable aux bas niveaux, s'amenuise progressivement, la courbe tendant asymptotiquement vers une courbe unique pour les hauts niveaux photopiques (loi de Weber) (Fig 4).

Ces résultats montrent qu'il est néanmoins avantageux, pour un écran, d'opérer à un niveau nettement photopique afin d'optimiser les performances spatiales visuelles.

2. Premières étapes de la reconnaissance d'un objet

En considérant le système visuel comme un filtre défini par la courbe de sensibilité au contraste en tant que courbe de filtrage, on pourrait supposer que la reconnaissance d'objets complexes puisse être prédite à partir de la sensibilité de chaque composante de Fourier de cet objet. Bien sûr cette opération ne pouvait conduire à une bonne prédiction que dans la mesure où le mécanisme visuel opérait selon un mode linéaire. En fait, même pour un test aussi simple qu'un réseau à profil carré de luminance, tout se passe comme si les composantes de Fourier étaient détectées séparément.

Ceci conduisit Campbell et Robson, dès 1968 (15), à postuler l'existence de plusieurs mécanismes (appelés canaux) sensibles à une gamme restreinte de fréquences spatiales. Diverses études utilisant trois techniques psychophysiques (sommation infra-liminaire, adaptation et masquage) ont permis de confirmer l'existence de tels mécanismes. Des travaux relativement récents, utilisant en particulier la technique de masquage, ont montré que le nombre de ces canaux indépendants était limité (16), leur largeur de bande étant de l'ordre de 2 octaves. Parallèlement à cette sélectivité aux fréquences spatiales, ces mécanismes s'avèrent présenter une sélectivité à l'orientation, les bandes passantes variant de $\pm 30^\circ$ à $\pm 15^\circ$. Ces recherches ont conduit à la description quantitative de filtres spatiaux bidimensionnels. Ces filtres, modélisés par différentes fonctions mathématiques (combinaisons de gaussiennes ou fonctions de Gabor), présentent un profil longiforme avec des lobes latéraux, leur transformée de Fourier s'adaptant aux courbes de filtrage sélectif évoquées précédemment (Fig 6).

Ainsi, la courbe de sensibilité au contraste peut être considérée comme l'enveloppe des courbes de réponse d'un ensemble de mécanismes sélectifs sensibles, chacun, à une gamme restreinte de fréquences spatiales. Au niveau spatial, les filtres qui leur correspondent procéderaient à une analyse locale de Fourier des fréquences spatiales de la scène de façon à permettre l'extraction en parallèle des caractéristiques spatiales élémentaires.

Ces résultats conduisirent à faire l'hypothèse que des composantes en fréquences spatiales différentes du signal d'entrée devaient être représentées indépendamment dans le cerveau par l'activité de neurones différents. La confirmation est venue d'études neurophysiologiques menées parallèlement. Différentes équipes de physiologistes ont étudié, chez l'animal, les réponses électrophysiologiques d'unités cellulaires à des stimuli simples puis à des réseaux à profil sinusoïdal de luminance. Elles ont trouvé, qu'à chaque étape de la chaîne visuelle, des cellules dont le champ récepteur correspondait à la même zone du champ visuel, pouvaient répondre chacune à un domaine de fréquences spatiales. De plus, la sélectivité aux fréquences spatiales relativement faible au niveau des cellules ganglionnaires s'accroît quand on progresse de la rétine au cortex (17). Ainsi, au niveau du cortex strié, les cellules simples, dont le champ récepteur longiforme est limité, présentent une sélectivité à l'orientation et à la

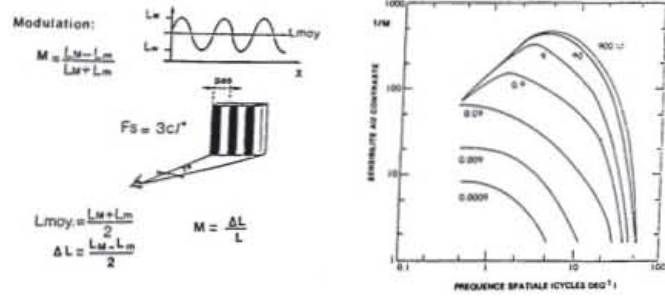


Fig.4. Courbe de sensibilité au contraste spatial (CSF) (d'après Van Nes et Bouman, 1967).

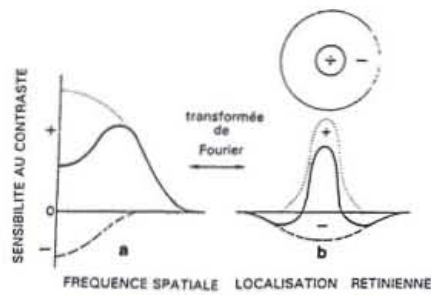


Fig.5. Relation entre la sensibilité au contraste modélisée par la différence de deux gaussiennes (a) et la réponse percussionnelle correspondante (b) (d'après Kelly, Optica Acta 1977).

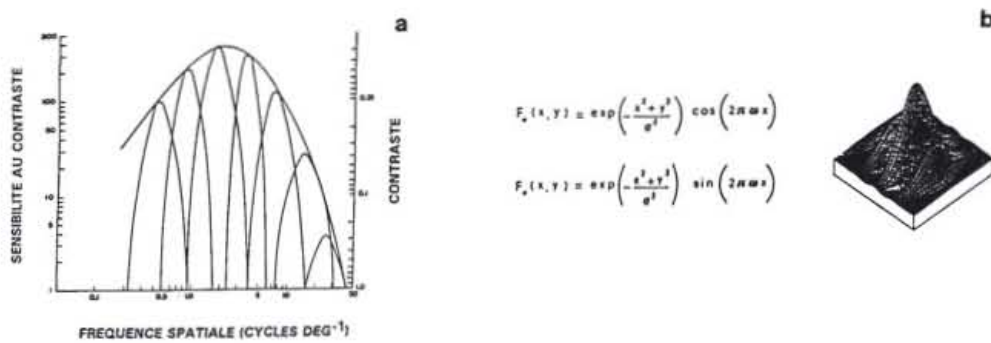


Fig.6. Modèle multi-canaux de la sensibilité au contraste (d'après Ginsburg, 1980) (a) et filtre spatial correspondant (d'après Daugman, 1980) (b).

fréquence spatiale correspondant à celle des mécanismes décrits en psychophysique. On note aussi l'existence d'autres cellules telles que les cellules complexes à large champ récepteur.

Le traitement en parallèle des différents attributs du stimulus (fréquence spatiale, orientation...), comme le prévoyait la psychophysique, semble possible grâce à la prépondérance numérique des cellules du cortex visuel sur les cellules ganglionnaires de la rétine (500 fois plus) et grâce à une ségrégation zonale des unités cellulaires. Le cortex visuel est en effet formé d'un pavage de modules d'environ 1mm², chacun analysant une zone du champ visuel. A l'intérieur de ces modules, les cellules codant la même orientation sont organisées en colonnes; on trouve également une organisation des cellules selon leurs réponses aux fréquences spatiales (18).

Ainsi, l'électrophysiologie et la psychophysique s'accordent sur le fait que l'image rétinienne est traitée localement en parallèle par des mécanismes correspondant à une gamme de filtres spatiaux (ou de bandes de fréquences spatiales) qui réalisent une sorte d'analyse de Fourier locale.

Le problème suivant est de savoir comment ces attributs sélectionnés, sont utilisés pour permettre la reconnaissance des objets. Il doit se produire une évaluation des éléments pour extraire l'information nécessaire à la perception visuelle. Cette étape aurait lieu dans les aires corticales associatives où se produirait une analyse globale encore mal connue.

En recherche fondamentale, de nombreux modèles ont été développés sur la base des réponses calculées de filtres localisés accordés à un domaine de fréquences spatiales. En particulier, le modèle de Wilson et Gelb (19) a été validé sur un grand nombre de tâches de discrimination; ce modèle est fondé sur la réponse de 6 mécanismes accordés chacun à un domaine de fréquences spatiales de 2 octaves et un domaine d'orientation de ± 15 à $\pm 30^\circ$ en orientation.

En dehors de la préoccupation d'une modélisation fidèle du système visuel et à un niveau plus appliqué, on a créé, à partir d'objets filtrés en 2D, des images telles qu'elles pourraient être "vues" à différentes étapes du processus visuel (20). En combinant une sélection des bandes utiles à la discrimination d'objets avec la sensibilité à ces différentes fréquences spatiales (courbe de sensibilité au contraste), il est possible de prédire, en première approximation, les seuils de détection et d'identification d'objets complexes tels que des lettres; on montre que les bandes de fréquence, utiles à l'identification, dépendent de la taille de l'objet et se situent dans les basses fréquences (21).

Enfin un autre type de modèle s'appuie sur l'hypothèse que les bords des objets, qui ont un contenu informatif important, sont extraits, pour différentes fréquences spatiales, par le système visuel à un stade précoce. La détection des bords se réduit à la détection d'un passage à zéro, un bord réel étant alors identifié si ce passage à zéro a lieu simultanément pour toutes les échelles de l'objet (12).

Les principaux modèles décrits ci-dessus permettent de mimer le traitement opéré par le système visuel en vue d'applications dans les systèmes de reconnaissance automatique ou dans la transmission de l'information pour les systèmes de visualisation, autorisant ainsi de forts taux de compression dans le codage de l'information.

3. Niveaux supraliminaires

Jusqu'à présent, seules les caractéristiques spatiales de l'oeil au seuil (détection, discrimination...) ont été abordées. Or, pour exécuter une tâche visuelle, c'est-à-dire, réussir avec une certaine probabilité une performance visuelle, il est nécessaire de se situer à un niveau supraliminaire. De nombreuses recherches psychophysiques dans ce domaine délicat où le système visuel ne fonctionne plus selon un mode linéaire sont actuellement en cours. La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a cependant établi des recommandations à partir d'un modèle qui considère que c'est la visibilité des contrastes qui conditionne la performance visuelle : la visibilité est alors caractérisée par le rapport du contraste de la tâche au contraste seuil, soit l'équivalent d'un rapport signal/bruit (22). Bien que ce modèle soit

actuellement en révision pour mieux tenir compte des récents acquis en recherche fondamentale, il permet de quantifier les niveaux supralimaires et de se situer par rapport à des zones recommandées (Fig 7).

V. CARACTERISTIQUES TEMPORELLES ET SPATIO - TEMPORELLES DU SYSTEME VISUEL

I. Caractéristiques temporelles

La réponse visuelle a été étudiée pour différentes lois de variation temporelle de la stimulation : flash rectangulaire et lumière périodique.

Bien que le système visuel permette de suivre les variations temporelles d'une scène visuelle, il est caractérisé par un temps d'intégration de la stimulation. En effet, lorsque la durée T d'un flash rectangulaire (de luminance L) est inférieure à une durée critique T_c de l'ordre de 1/10 sec, sa visibilité ne dépend que de la quantité de lumière LT (loi de Bloch) (Fig 8). Lorsque la luminance du fond L sur lequel est projeté le test flashé augmente, la durée critique diminue, ce qui correspond à une meilleure capacité de résolution temporelle. Parallèlement, la sensibilité $L/\Delta L$, qui représente la capacité relative de distinguer le flash du fond, augmente jusqu'à une limite correspondant à la loi de Weber (voir caractéristiques spatiales).

La réponse temporelle du système visuel a été aussi étudiée pour des lumières périodiques. A l'origine, les premiers travaux se sont limités à la détermination de la fréquence maximum d'alternance de la lumière modulée en tout ou rien (modulation 100%) au delà de laquelle le papillotement n'est plus perçu (fréquence critique de fusion CFF).

La théorie des systèmes a permis d'étendre cette investigation aux autres fréquences temporelles et pour des modulations variées, le système visuel étant alors considéré comme un filtre temporel dont on détermine la courbe de réponse. La luminance du test utilisé, tout en présentant une distribution spatiale uniforme, varie temporellement selon une loi de variation sinusoïdale. La définition de la modulation temporelle M (ou du contraste), qui caractérise l'amplitude relative d'oscillation autour de la luminance moyenne, est similaire à celle de la modulation spatiale. En demandant à l'observateur d'ajuster, pour chaque fréquence temporelle, la modulation temporelle au seuil (M_s), on obtient une courbe de sensibilité au contraste temporel ($1/M_s$) ou courbe de De Lange (Fig 9). Cette courbe présente un caractère passe-bande avec une sensibilité maximale de 100 à 200 au voisinage de 5 Hz. Vers les hautes fréquences, la fréquence de coupure qui correspond à la fréquence critique de fusion (ou à la limite de résolution temporelle) est atteinte entre 30 et 90 Hz (23). Au delà de cette limite, les lumières apparaissent fusionnées; la loi de Plateau-Talbot précise alors que la luminance résultante est la moyenne de la luminance instantanée prise sur une période.

L'évolution de cette courbe en fonction du niveau lumineux présente une grande similitude avec celle observée pour la sensibilité au contraste spatial. Aux bas niveaux lumineux, le profil passe-bas de la courbe, associé à une résolution temporelle médiocre (CFF décalée vers les basses fréquences), est corrélé avec un temps de réponse plus long pour les bâtonnets que pour les cônes. L'augmentation de la luminance L entraîne un accroissement de la sensibilité ($1/M_s$) et un déplacement de la fréquence critique de fusion (CFF) vers les hautes fréquences (Fig 9); ces variations de la fréquence critique de fusion en fonction de la luminance suivent la loi de Ferry-Porter : $CFF = k \log(L)$.

Si l'on ajoute l'influence de l'excentricité à celle de la luminance, on observe que le papillotement, d'abord perçu en périphérie pour un bas niveau lumineux, est de plus en plus visible en vision centrale lorsque le niveau augmente.

Si l'on quitte le domaine de la simple détection pour s'intéresser aux capacités du système visuel à discriminer les fréquences temporelles, on note qu'un observateur n'est capable de classer les fréquences qu'en deux catégories : les hautes et les basses fréquences. Des travaux équivalents à

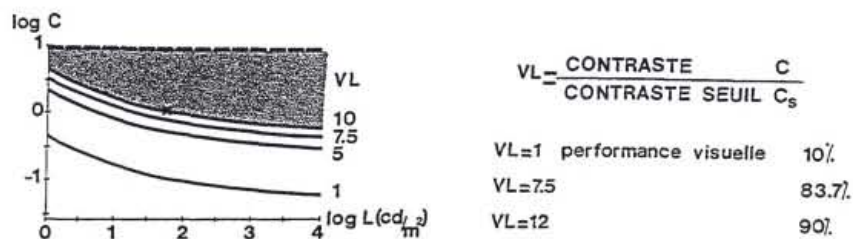


Fig.7. Visibilité des contrastes : recommandations CIE (zone grisée).

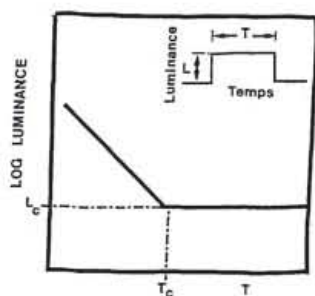


Fig.8. Loi de Bloch.

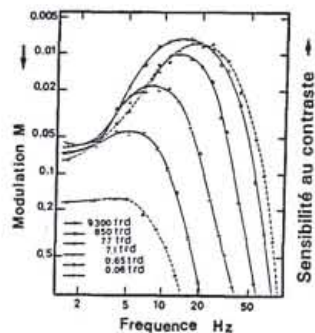


Fig.9. Courbes de sensibilité au contraste temporel (courbe de De Lange) (d'après Kelly, 1961).

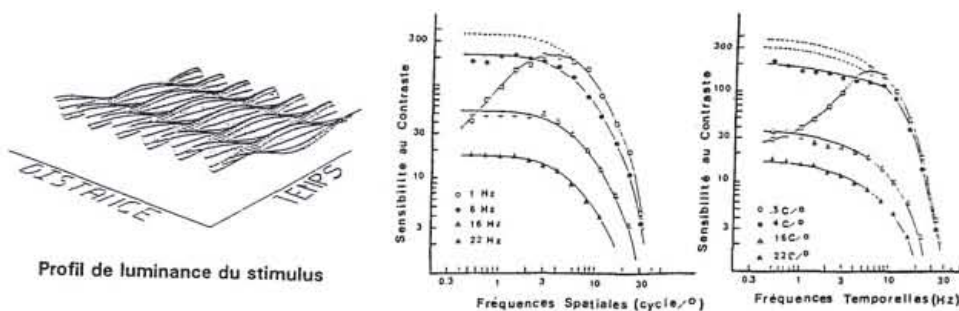


Fig.10. Interactions spatio-temporelles (d'après Robson, 1966).

ceux entrepris pour la discrimination spatiale révèlent seulement l'existence de deux mécanismes : un rapide ou phasique pour les moyennes et hautes fréquences et un plus lent ou tonique pour les basses fréquences. Au niveau physiologique, deux classes de cellules ont été répertoriées : les cellules toniques qui répondent de manière soutenue à une stimulation et les cellules phasiques qui ne répondent qu'à l'allumage et à l'extinction du stimulus (24).

Les caractéristiques temporelles du système visuel sont d'un grand intérêt pour la visualisation. Pour la perception des lumières brèves, la loi de Bloch est valable quelle que soit la structure spatiale présentée en un temps limité; de plus, elle convient aussi aux niveaux supraliminaires. L'augmentation des niveaux lumineux des écrans va dans le sens d'une meilleure utilisation des caractéristiques spatiales et temporelles du système visuel; mais il est alors nécessaire de compenser certains phénomènes parasites tels que le papillotement; celui-ci, lié au balayage des écrans à tube cathodique, est mieux perçu à des niveaux lumineux élevés, d'où la nécessité d'augmenter la fréquence de balayage.

La courbe de sensibilité au contraste temporel permet en particulier de prévoir le papillotement d'un écran à tube cathodique quelconque; on peut, à partir de ses caractéristiques techniques (type de luminophores, fréquence de balayage), calculer la modulation temporelle physique de la fréquence fondamentale et en déduire la visibilité du papillotement.

2. Caractéristiques spatio - temporelles

La dimension du test a une grande influence sur la courbe de sensibilité au contraste temporel. Outre une augmentation de la fréquence critique de fusion, on note principalement une chute significative de la sensibilité aux basses fréquences temporelles.

Les phénomènes d'interaction spatio-temporelle ont été examinés de manière plus générale et plus systématique en utilisant des réseaux spatiaux à profil de luminance sinusoïdale, soit avec inversion de phase selon une loi temporelle sinusoïdale, soit avec déplacement à vitesse constante (réseau défilant) (25, 26) (Fig 10). Aux basses fréquences temporelles, les interactions sont très significatives : une haute fréquence spatiale provoque une amélioration de la sensibilité tandis qu'une basse fréquence spatiale provoque un phénomène inverse ce qui confirme le résultat précédent relatif à l'influence de la dimension. Par contre, les interactions spatio-temporelles cessent aux hautes fréquences temporelles (Fig 10).

Parallèlement aux interactions observées au niveau de la courbe de sensibilité au contraste temporel, la sensibilité au contraste spatial dépend aussi de facteurs temporels. Ainsi, la sensibilité au contraste spatial, établie dans des conditions stationnaires de stimulation, augmente de manière significative dans les basses fréquences si le test est soumis à une modulation temporelle; le même phénomène est observé avec un réseau flashé. Ces interactions cessent aux hautes fréquences spatiales (Fig 10).

Ces phénomènes d'interaction spatio-temporelle interviennent particulièrement dans les dispositifs de visualisation pour lesquels l'information spatiale est présentée séquentiellement par balayage. Les données précédentes permettent, en particulier, d'expliquer qu'une inhomogénéité spatiale de luminance, peu visible en lumière stable, le devient en lumière papillotante et qu'un battement parasite basse fréquence sur un écran sera, dans certains cas, plus facilement observable en présence d'une structure spatiale.

VI. COULEUR

Lorsque la répartition spectrale de la lumière est déséquilibrée au profit d'une ou plusieurs régions du spectre, la sensation lumineuse s'accompagne généralement d'une sensation de couleur. Le traitement de l'information relative à la couleur nécessite plusieurs étapes. Aussi est-on amené à aborder successivement au moins trois questions: la spécification, la discrimination et l'identification des couleurs.

1. Trivariance et spécification des couleurs. Colorimétrie

1.1. Représentation dans un espace vectoriel

Cas général

L'expérience montre qu'il est possible de reproduire presque toutes les couleurs par un mélange additif de trois lumières colorées en quantités convenables. Ces quantités R, G, B spécifient la couleur [Q] de façon unique à partir des trois lumières [R], [G], [B]. On appelle cette expérience une égalisation de couleur, qui s'écrit sous la forme d'une équation chromatique:

$$[Q] \equiv R [R] + G [G] + B [B]$$

Le choix des trois lumières constituant le mélange est très large, à condition qu'aucune ne puisse être reproduite par un mélange des deux autres. Le mélange doit être additif, c'est-à-dire que les trois lumières doivent parvenir directement sur la rétine. Cette expérience démontre la trivariance visuelle: toute couleur, aussi complexe que soit son spectre, se trouve spécifiée par trois nombres. C'est le fondement de la théorie trichromatique de Young Helmholtz (1852). La couleur égalisée et le mélange sont dits métamères: ils apparaissent identiques, bien que physiquement différents. L'expérience montre aussi que les résultats des égalisations de couleur obéissent aux lois de proportionnalité et d'additivité (lois de Grassmann):

si $[Q_1] \equiv [Q_2]$, et si α est un facteur de proportionnalité, alors $\alpha [Q_1] \equiv \alpha [Q_2]$

et si en outre $[Q'_1] \equiv [Q'_2]$, alors $[Q_1] + [Q'_1] \equiv [Q_2] + [Q'_2]$

Il est donc légitime de représenter les couleurs comme des vecteurs [Q] dans un espace à trois dimensions, dont chaque axe porte un vecteur unitaire représentant chaque couleur primaire, par exemple les vecteurs [R], [G], [B] représentant des primaires réelles ou les vecteurs [X], [Y], [Z] représentant les primaires théoriques retenues par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) (27, 28). Tous ces jeux de primaires se valent et se substituent les uns aux autres par transformation linéaire. Les composantes R, G, B ou X, Y, Z du vecteur [Q] sont appelées composantes trichromatiques.

Cas particulier des rayonnements monochromatiques

Avec les rayonnements monochromatiques, on pratique une variante de l'égalisation par des primaires réelles, car une des primaires doit être prélevée du mélange et ajoutée au rayonnement monochromatique pour réussir l'expérience. Comme les couleurs peuvent être traitées comme des vecteurs, en admettant d'écrire des valeurs négatives pour les quantités de lumière déplacées du côté du rayonnement monochromatique $[\bar{s}(\lambda)]$, on se ramène au cas général:

$$[\bar{s}(\lambda)] \equiv \bar{r}(\lambda) [R] + \bar{g}(\lambda) [G] + \bar{b}(\lambda) [B]$$

où $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ sont des quantités positives ou négatives, selon le schéma expérimental imposé à chaque longueur d'onde.

Le système de référence (X Y Z) de la Commission Internationale de l'Eclairage a été en particulier choisi pour ne manipuler que des quantités positives:

$$[\bar{s}(\lambda)] \equiv \bar{x}(\lambda) [X] + \bar{y}(\lambda) [Y] + \bar{z}(\lambda) [Z]$$

Les valeurs $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ correspondant aux rayonnements monochromatiques $[\bar{s}(\lambda)]$ de même flux énergétique s'appellent les coefficients colorimétriques. Spécifiées à chaque longueur d'onde pour l'observateur de référence CIE 1931, elles établissent les trois fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ (Fig 11).

Etant donné un rayonnement non monochromatique de répartition spectrale d'énergie P_λ , la propriété d'additivité des égalisations de couleur justifie d'attribuer à ce rayonnement les composantes trichromatiques suivantes:

$$\begin{aligned} X &= K_M \int P_\lambda \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= K_M \int P_\lambda \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= K_M \int P_\lambda \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

et de représenter le stimulus de couleur [Q] dans le système de référence colorimétrique (X Y Z) par :

$$[Q] \equiv X [X] + Y [Y] + Z [Z]$$

1.2. Représentation dans le diagramme de chromaticité

Dans la représentation vectorielle d'un stimulus, la longueur du vecteur indique le niveau lumineux, et l'orientation du vecteur indique la chromaticité, c'est-à-dire la part colorée proprement dite, abstraction faite du niveau lumineux. On propose donc de représenter la chromaticité par le point d'intersection du vecteur avec le plan unitaire de l'espace trichromatique (Fig 12). Les coordonnées de ce point, appelées coordonnées trichromatiques, représentent les proportions de chaque primaire dans le mélange qui égalise la couleur :

$$\begin{aligned} x &= X / (X + Y + Z) \\ y &= Y / (X + Y + Z) \\ z &= Z / (X + Y + Z) \end{aligned}$$

Etant donné que :

$$x + y + z = 1$$

il suffit pour désigner la chromaticité de la représenter par deux coordonnées trichromatiques x, y dans un diagramme plan, appelé diagramme de chromaticité. L'ensemble des chromaticités des couleurs réelles est situé à l'intérieur d'une courbe représentant les chromaticités des rayonnements chromatiques, appelée lieu spectral. Une couleur se trouve donc sans équivoque spécifiée par trois nombres x, y, et Y. Y désigne la luminance, car le choix des primaires de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a été fait de telle sorte que :

$$\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$$

1.3. Colorimétrie des écrans

Pour obtenir une couleur sur un écran video, on réalise un mélange additif des lumières rouge, verte et bleue émises par les luminophores du tube cathodique. On reprend la notation vectorielle :

$$[Q] \equiv R [R] + G [G] + B [B]$$

où [R], [G], [B] désignent les vecteurs correspondant aux primaires réelles de l'écran étudié et les coefficients R, G, B indiquent la contribution des primaires au mélange. Par convention, un stimulus de couleur s'exprime dans le système de référence colorimétrique CIE par :

$$[Q] \equiv X [X] + Y [Y] + Z [Z]$$

où X, Y, Z désignent les composantes trichromatiques du stimulus de couleur et [X], [Y], [Z] les stimulus de couleur de référence adoptés par la Commission Internationale de l'Eclairage. Le problème consiste à calculer R, G, B connaissant X, Y, Z, ou l'inverse. Il est résolu par une transformation linéaire (29, 30). Ainsi, à partir de la représentation vectorielle d'un stimulus de couleur [Q] :

$$[Q] = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{pmatrix} + G \begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix}$$

on écrit sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

En pratique, le constructeur d'un moniteur video indique les coordonnées trichromatiques de chaque luminophore $x_R, y_R; x_G, y_G; x_B, y_B$; et se conforme aux recommandations selon lesquelles le stimulus de référence blanc de coordonnées x_w, y_w s'obtient en appliquant le même signal sur les trois entrées video du moniteur. Or, il convient d'effectuer les transformations linéaires sur les composantes trichromatiques. Puisqu'on ne dispose que des coordonnées trichromatiques, on pose pour chacun des trois luminophores ($i = R, G, B$) :

$$m_i = X_i + Y_i + Z_i$$

d'où les composantes trichromatiques :

$$X_i = m_i x_i; \quad Y_i = m_i y_i; \quad Z_i = m_i z_i$$

que l'on inclut dans la matrice :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_R x_R & m_G x_G & m_B x_B \\ m_R y_R & m_G y_G & m_B y_B \\ m_R z_R & m_G z_G & m_B z_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

soit :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_R R \\ m_G G \\ m_B B \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} m_R R \\ m_G G \\ m_B B \end{pmatrix}$$

et par inversion de la matrice :

$$\begin{pmatrix} m_R R \\ m_G G \\ m_B B \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Les valeurs inconnues m_R, m_G, m_B sont alors calculées pour le stimulus de référence blanc obtenu lorsque $R = G = B = 1$, et dont on a éventuellement mesuré la luminance $Y = L_w$ (sinon, on pose $L_w = 1$). Dans ce cas :

$$\begin{pmatrix} m_R \\ m_G \\ m_B \end{pmatrix} = M^{-1} L_w / y_w \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 - x_w - y_w \end{pmatrix}$$

Notons que c'est souvent le blanc D65 qui est obtenu par les primaires d'écran à leur maximum, et que seules les couleurs situées à l'intérieur du triangle formé par les coordonnées trichromatiques des trois luminophores peuvent être reproduites sur l'écran.

1.4. Origine de la trivariance visuelle. Les trois types de cônes.

L'origine de la trivariance visuelle réside dans la présence dans la rétine de trois types de cônes photorécepteurs, dont les sensibilités spectrales diffèrent et sont largement étendues sur le spectre visible (Fig 13) (31). Si l'on considère un cône individuellement, un photon de longueur d'onde donnée λ a une probabilité plus ou moins élevée d'être absorbé, selon que sa longueur d'onde est plus ou moins proche du maximum de sensibilité spectrale du pigment photosensible. Mais tout photon absorbé, quelle que soit sa longueur d'onde, a pour effet de déclencher le même signal dans le cône. On dit que la réponse du cône est univariante, c'est-à-dire qu'elle ne peut varier qu'en amplitude, alors que la lumière stimulante est caractérisée par son intensité et sa longueur d'onde.

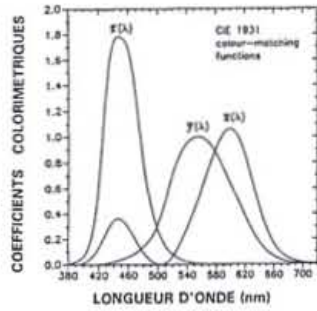


Fig.11. Fonctions colorimétriques dans le système de référence colorimétrique CIE 1931.

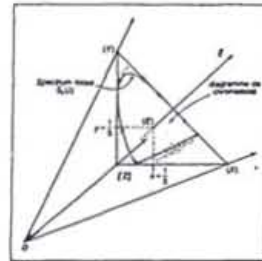


Fig.12. Espace chromatique (X Y Z) de la CIE 1931 et diagramme de chromaticité x,y (d'après Wyszecki et Stiles, 1982).

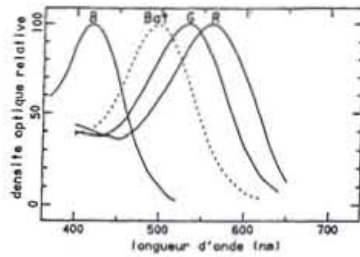


Fig.13. Spectres de densité des bâtonnets (..) et des cônes (-) B, G et R chez l'Homme (d'après Dartnall et al.).

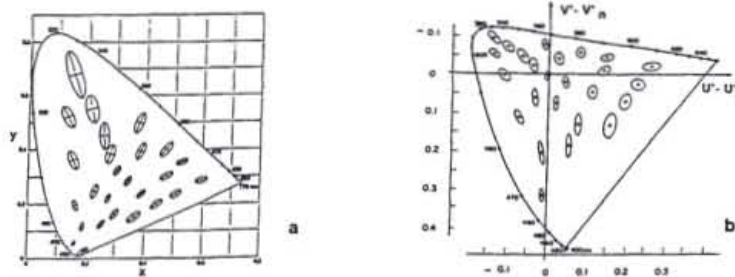


Fig.14. Ellipses de Mac Adam représentant les plus petites différences de chromaticité discernables de la couleur centrale (grossies 3 fois): a) diagramme x,y (d'après Mac Adam, 1942); b) diagramme de chromaticité uniforme CIE 1976 (d'après Sève, 1990).

C'est ainsi que toute lumière a pour effet d'initialiser trois signaux au niveau des cônes, dont les amplitudes sont pondérées par la répartition spectrale d'énergie. Ceci permet d'expliquer que deux lumières puissent être métamères: elles engendrent les mêmes signaux au niveau des cônes, même si leurs répartitions spectrales d'énergie sont différentes.

2. Discrimination des couleurs. Codage des signaux chromatiques

Lorsque deux couleurs sont très voisines, la question se pose de savoir si elles sont discernables et comment chiffrer leur écart. L'étude de la sensibilité différentielle permet de caractériser la faculté du système visuel à discerner les couleurs entre elles.

2.1. Mesure de la sensibilité différentielle colorée

La mesure de l'écart en longueur d'onde qui permet de différencier deux rayonnements monochromatiques montre que, la luminance étant maintenue constante, la sensibilité différentielle le long du spectre pour la tonalité est la meilleure autour de 590 nm (< 1 nm) et de 490 nm (1 à 2 nm).

Sur le diagramme de chromaticité, le seuil différentiel de chromaticité, à luminance constante, est représenté par les ellipses de MacAdam (32) qui indiquent où se situent les couleurs qui s'écartent d'une couleur donnée. Leur taille, leur orientation et leur forme varient dans le diagramme (Fig 14a). Ces paramètres varient aussi avec la fréquence temporelle ou la fréquence spatiale, les ellipses de MacAdam représentant des mesures effectuées à basse fréquence temporelle ou spatiale. Enfin, le seuil différentiel de couleur (chromaticité et luminance associées) est représenté par des ellipsoïdes.

Diagramme de chromaticité uniforme

En raison de la non-uniformité de la représentation des seuils différentiels, le diagramme de chromaticité x,y de la Commission Internationale de l'Eclairage se prête mal à l'évaluation des différences de couleur. Une amélioration est obtenue par transformation projective du diagramme de chromaticité x,y , qui conduit au diagramme de chromaticité uniforme CIE 1976 dont les coordonnées cartésiennes sont :

$$u' = 4x / (-2x + 12y + 3)$$

$$v' = 9y / (-2x + 12y + 3)$$

Dans ce diagramme, la variabilité des dimensions des ellipses est diminuée d'un facteur 5 environ (Fig 14b).

Espaces chromatiques uniformes

Cependant ce diagramme de chromaticité ne permet pas de caractériser globalement des différences de couleur, les couleurs pouvant à la fois différer en chromaticité, mais aussi en luminance. C'est pourquoi on représente la stimulation colorée dans un espace chromatique uniforme, en combinant un diagramme de chromaticité uniforme à une échelle uniforme de clarté portée en ordonnée. La clarté CIE 1976 dérive de la luminance selon une loi non linéaire corrélée avec la sensation de clarté (c'est-à-dire qu'une échelle uniforme de clarté CIE 1976 donne une échelle de stimulus perçus équidistants en sensation lumineuse) :

$$L^* = 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

$$u^* = 13 L^* (u' - u'_n)$$

$$v^* = 13 L^* (v' - v'_n)$$

A noter que u^* et v^* dérivent respectivement de u' et v' par un changement d'origine (point neutre) et d'une multiplication par $13 L^*$. Cette dernière transformation permet de tenir compte du fait qu'à différence donnée de chromaticité, l'écart apparent de couleur de deux stimulus augmente lorsque la clarté augmente. Les petites différences de couleur sont caractérisées dans cet espace par la formule :

$$\Delta E_{uv}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}$$

$\Delta E^* = 1$ indique une tolérance commerciale moyenne correspondant à une différence nettement perceptible de l'ordre de 2 à 4 fois le seuil différentiel.

Comme après transformation, les droites du diagramme de chromaticité x,y restent droites dans le diagramme de chromaticité u',v', l'espace chromatique CIE 1976 (L* u* v*) est particulièrement adapté à la représentation de l'espacement des couleurs pour la télévision. Il est à noter qu'un 2ème espace chromatique uniforme CIE dit CIELAB a été aussi défini, mais il dérive du diagramme x,y selon une transformation non linéaire. Il est particulièrement recommandé dans l'industrie des colorants.

A partir des travaux de MacAdam, Judd (33) avait évalué à 10^7 le nombre de teintes discernables par un oeil humain, ce qui correspond approximativement au nombre ($1,7 \cdot 10^7$) de stimulus disponibles sur un écran disposant de 256 niveaux lumineux pour chaque primaire. Mais en réalité, le système visuel ne fonctionne de façon optimale que dans l'environnement lumineux et coloré auquel il est adapté, ce qui diminue le nombre de teintes à mettre à sa disposition. On note que la plupart des collections systématiques d'échantillons colorés présentent environ mille teintes.

2.2. Antagonisme spectral dans le codage des signaux des cônes. Multiplexage

La grande sensibilité du système visuel aux différences de couleur vient de l'antagonisme spectral qui se manifeste entre les signaux issus des cônes au niveau post-réceptoral. Ceci permet, avec des sensibilités spectrales assez peu différentes entre photorécepteurs, d'affiner considérablement la discrimination spectrale. Environ 50% des cellules ganglionnaires de la rétine manifestent cet antagonisme spectral si l'on éclaire la rétine avec des lumières monochromatiques variées : elles répondent par une excitation à une partie du spectre et par une inhibition à l'autre partie du spectre (34).

Cependant, ce sont ces mêmes cellules ganglionnaires qui transmettent des informations relatives au contraste spatial et éventuellement à la modulation temporelle. Aussi le signal véhiculé par une cellule considérée isolément, est-il ambigu quant à son origine. Il y a un multiplexage, imposé par une limite de charge au transfert de l'information, qui nécessitera un démultiplexage ultérieur.

Une conséquence importante du multiplexage entre les signaux chromatiques et l'information spatiale et temporelle apparaît en photométrie. L'évaluation de l'apparence lumineuse d'un stimulus dépend de ses conditions de présentation. Si le stimulus est présenté dans des conditions de fréquence spatiale ou temporelle élevée (supérieure à 10 Hz ou 10 cycles par degré), l'apparence lumineuse correspond bien à la luminance mesurée par un photomètre. Mais si le stimulus est présenté en permanence ou en grande dimension, une réponse d'origine chromatique ajoute sa contribution à l'apparence lumineuse; si bien que des stimulus colorés de même luminance qu'une plage blanche apparaissent plus lumineux que celle-ci. La grandeur apte à traduire l'apparence lumineuse est la luminosité B; le rapport B/L est supérieur à l'unité (Fig 15a & b). La Commission Internationale de l'Eclairage étudie depuis plusieurs années ce problème complexe. Contrairement à la luminance en effet, la luminosité n'est pas une grandeur additive.

2.3. Interactions spatiales, temporelles et chromatiques. Fonctions de sensibilité au contraste chromatique

De même que l'on a défini une fonction de sensibilité au contraste spatial ou au contraste temporel de luminance, il est possible d'établir une fonction de sensibilité au contraste chromatique. Pour ce faire, il importe d'opérer à luminance constante, seule la chromaticité pouvant varier dans le test. La sensibilité au contraste chromatique spatial ou temporel est une fonction passe-bas, dont la fréquence de coupure est environ 1/3 de celle correspondant au

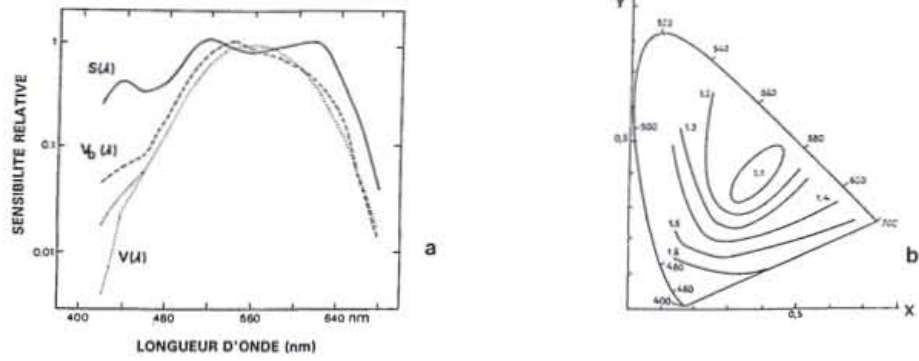


Fig. 15. a) Sensibilités relatives aux rayonnements mono-chromatiques: $V(\lambda)$ pour la luminance, $V_p(\lambda)$ pour la luminosité, $S(\lambda)$ pour les lumières présentées sur un fond lumineux; b) courbes à valeur constante du rapport luminosité/luminance dans le diagramme de chromaticité x, y (d'après Sanders et Wyszecki, 1963).

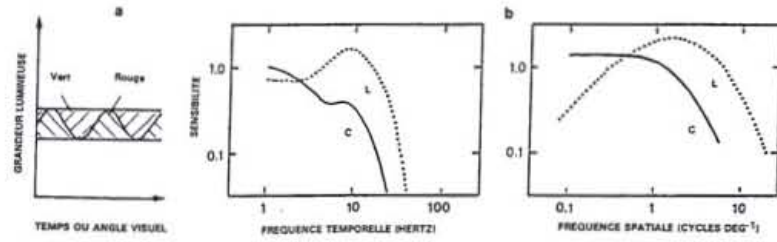


Fig. 16. a) Stimulus chromatique isoluminant; b) courbes de sensibilité à la modulation lumineuse (L) et à la modulation chromatique (C) en fonction de la fréquence temporelle en Hz et de la fréquence spatiale en cpd.

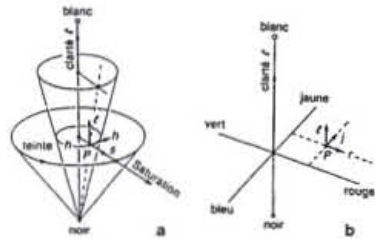


Fig. 17. Représentation des couleurs perçues: a) dans le système Munsell; b) dans le système NCS (d'après Judd et Wyszecki, 1975).

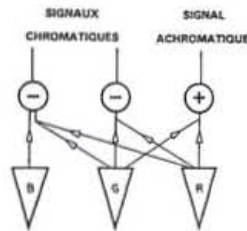


Fig. 18. Modèle de vision des couleurs: 1ère et 2ème étapes du fonctionnement.

contraste lumineux. On constate donc qu'aux fréquences temporelles ou spatiales élevées, le système visuel privilégie les contrastes lumineux par rapport aux contrastes chromatiques, au point de n'être sensible qu'aux contrastes lumineux au-delà de 10-20 Hz ou de 10-15 cycles par degré; en revanche, aux fréquences basses (< 0.5 cpd ou < 3 Hz), il est plus sensible aux contrastes chromatiques qu'aux contrastes lumineux (Fig. 16). Ces capacités dérivent vraisemblablement du multiplexage de l'information transférée vers le système nerveux central.

Ces données s'appliquent à la transmission télévisée où le signal chromatique est transmis avec une bande passante moins large que celle du signal lumineux.

3. Identification et apparence des couleurs

3.1. Les attributs de la couleur

Identifier les couleurs ou décrire leur apparence est une opération d'un tout autre ordre que juger si deux couleurs sont identiques ou non.

On peut décrire une couleur à l'aide de trois attributs perceptifs (Fig 17a) :

- la tonalité : rouge, orange, jaune, etc.
- la luminosité (pour des objets émettant de la lumière) ou la clarté (pour des surfaces réfléchissantes),
- la saturation : degré d'éloignement au stimulus achromatique de même luminosité.

La classification selon Munsell propose trois échelles pour ces attributs : Hue, Value, Chroma. Elle est matérialisée sous forme d'échantillons pigmentaires qui servent de référence. On peut aussi décrire une couleur par rapport à quatre teintes élémentaires qui constituent une structure naturelle de notre perception colorée : Vert opposé au Rouge et Bleu opposé au Jaune, et par rapport à la paire Noir opposé au Blanc (Fig 17b). La classification ordonnée autour de ces paires antagonistes remonte aux propositions de Hering (1876). Elle est matérialisée par les échantillons du Natural Color System.

3.2. Constance de couleur et induction chromatique

Un défi majeur à la recherche sur la vision des couleurs est posé par le phénomène de constance de couleur, selon lequel un objet coloré placé dans son environnement ne change presque pas d'apparence colorée lorsque l'on change la source d'éclairage. En dépit de changements parfois importants dans la répartition spectrale relative d'énergie de la lumière parvenant au sujet, le système visuel est capable de compenser ces changements et de rétablir l'apparence des couleurs. Le modèle simple des coefficients de Von Kries selon lequel la sensibilité de chaque type de récepteur est modifiée par un facteur propre à chacun d'eux afin de maintenir constante la réponse visuelle au stimulus de référence blanc, conduit à une bonne approximation :

$$R' = k_r R$$

$$G' = k_g G$$

$$B' = k_b B$$

Des modèles plus complexes (35, 36) sont fondés sur cette formulation. L'approche computationnelle pourrait ouvrir de nouvelles stratégies.

L'induction chromatique résulte de la contiguïté de deux couleurs. Généralement, le voisinage entraîne une exaltation des différences de couleur dans le sens de la couleur complémentaire de la couleur juxtaposée. Parfois, certaines configurations spatiales parcellisées entraînent au contraire un phénomène d'assimilation, c'est-à-dire, de rapprochement apparent des couleurs. Le modèle de Hurvich (1951) tient compte de l'induction chromatique.

3.3. Unités modulaires du codage de la couleur. Double antagonisme chromatique.

Au niveau du cortex strié, où la majorité des cellules sont câblées et organisées pour détecter

L'orientation des bords dans une image, un petit nombre de neurones, amassés régulièrement dans le cortex (blobs), ne présentent pas de sélectivité à l'orientation, mais un double antagonisme chromatique : elles répondent par une excitation à une partie du spectre et par une inhibition au reste du spectre, au centre de leur champ récepteur, mais dans le sens inverse à la périphérie (37). Elles seraient ainsi spécialisées dans la détection de contrastes purement chromatiques. C'est aussi à ce niveau qu'apparaît l'aspect modulaire du traitement de l'information, la couleur étant traitée sur une voie différente de la forme.

Actuellement, il semble que dans une aire visuelle préstriée (V4 chez le singe) se trouvent des cellules qui répondent à la couleur dans quelque environnement qu'elle soit, plutôt qu'à la situation spectrale du stimulus, ce qui correspondrait au phénomène de constance de couleur (38).

3.4. Modèle de vision des couleurs.

La colorimétrie, qui est fondée sur la trivariance visuelle, constitue la méthode par excellence de spécification des couleurs. Elle permet de dissocier la luminosité ou la clarté d'une couleur de sa chromaticité. La discrimination des couleurs est aussi traitée par la colorimétrie, à l'aide de formulations linéaires ou non-linéaires. L'apparence colorée n'est pas encore bien formalisée.

Le fonctionnement de la vision colorée peut être décrit par un modèle de traitement de l'information en plusieurs étapes (Fig 18). A l'entrée, trois familles de cônes codent le stimulus en trois signaux, fondant ainsi la trivariance visuelle. A l'étape suivante, ces signaux s'additionnent pour donner un signal lumineux ou se retranchent pour donner deux signaux chromatiques (39). Cependant, au niveau même des structures nerveuses, ces signaux restent multiplexés. Plusieurs étapes sont ensuite nécessaires pour isoler plus complètement les constituants fondamentaux de l'apparence colorée et identifier la couleur attribuée à un objet.

VII. PERCEPTION DU RELIEF PAR LE SYSTEME VISUEL

La localisation des objets en profondeur est une fonction essentielle pour l'évaluation de l'environnement tridimensionnel. Elle est obtenue à partir d'indices monoculaires et binoculaires de profondeur.

1. Indices monoculaires

Des indices monoculaires peuvent être utilisés pour recréer une sensation de relief :

- La parallaxe monoculaire liée au mouvement, soit de la cible, soit de la tête, est due à des variations de vitesse angulaire des points de l'espace en fonction de leur profondeur.
- La taille relative de deux objets peut être utilisée pour apprécier leur distance.
- La perspective et l'ombrage constituent des indices importants de profondeur.
- L'interposition joue un rôle parfois prépondérant; la perception de la taille et de la profondeur peut être très distordue si l'interposition est utilisée selon un mode non familier.
- Les gradients de contraste, de texture et de couleur sont aussi des facteurs importants; en particulier, une baisse de contraste ou le bleuissement sont interprétés comme un éloignement.

L'utilisation de ces indices monoculaires joue actuellement un rôle prépondérant pour une présentation d'information tridimensionnelle sur des écrans conventionnels; cependant, pour être effectifs, ils doivent représenter une simulation réaliste de nos expériences visuelles de tous les jours.

2. Indices binoculaires

L'excitation simultanée des deux rétines peut donner lieu à une coopération active qui est la base essentielle du sens de la profondeur et du relief (40). Lorsque les yeux fixent un point de l'espace visuel, leurs lignes principales de visée convergent en ce point. La sensation de fusion

des deux images peut intervenir; elle entraîne alors la localisation de ce point dans une direction visuelle binoculaire unique; les points rétiens stimulés sont dits correspondants.

Pour un point de fixation donné, l'ensemble des points de l'espace qui se projettent sur des points correspondants, c'est-à-dire, pour lesquels il y a fusion, sont situés sur une surface appelée horoptère. En avant et en arrière de cette surface on pourrait s'attendre à une sensation de vision double ou diplopie, c'est-à-dire, à la localisation de chacune des images dans une direction visuelle spécifique (Fig 19a). En réalité la fusion étant maintenue dans une certaine zone de part et d'autre de l'horoptère, ceci a conduit à élargir le concept de point correspondant à celui d'aire fusionnelle (aire de Panum). La dimension de cette aire dépend de la configuration spatiale et temporelle de la stimulation.

Compte tenu de l'écartement horizontal des deux yeux, les projections du monde extérieur sur les deux rétines droite et gauche sont légèrement différentes; ces différences relatives constituent la disparité binoculaire. La disparité est traitée par le système visuel pour donner la sensation de relief, c'est-à-dire, l'estimation subjective de la distance relative (Δd) des objets. Elle est mesurée par la différence de dimension angulaire des deux images rétinienne droite et gauche; elle est donnée par la formule suivante (Fig 19b) :

$$U_1 - U_2 = \omega \Delta d / d \text{ où } d \text{ est la distance absolue}$$

Le seuil de disparité, de l'ordre de quelques secondes d'arc (10 secondes), correspond à une discrimination très fine des distances relatives (acuité stéréoscopique); ce seuil dépend de différents facteurs : luminance, distance latérale...

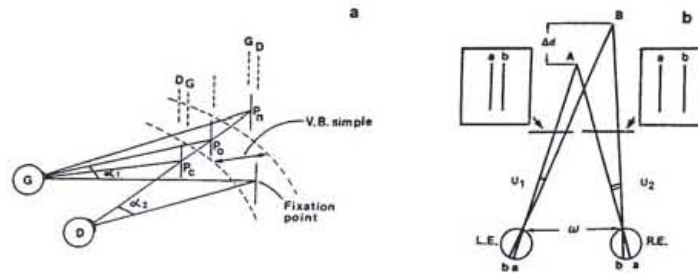


Fig.19. Vision binoculaire : a) Zone de vision binoculaire simple (fusion) (d'après Ogle, 1950); b) Définition de la disparité binoculaire (d'après Bourdy, 1989).

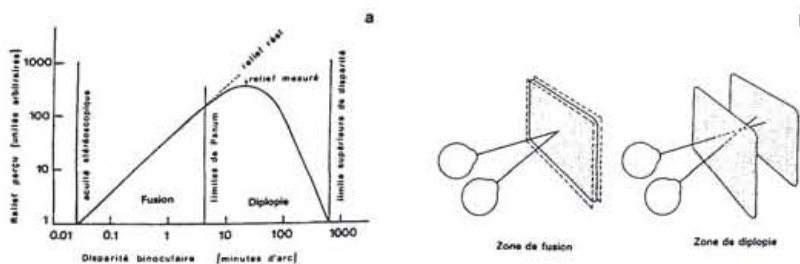


Fig.20. a) Variation du relief perçu en fonction de la disparité binoculaire (d'après Tyler et Richards, 1983); b) Relief perçu à partir de stéréogrammes (d'après Tyler, 1983).

Dans la zone de fusion binoculaire, la perception du relief, déclenchée à partir du seuil d'acuité stéréoscopique, varie d'abord linéairement avec la disparité binoculaire et correspond au relief réel. Au delà d'une disparité de 10 à 20 min d'arc (aire de Panum), la fusion n'est plus maintenue mais le relief est encore perçu et passe même par un maximum puis décroît (Fig 20a).

L'illusion de relief est souvent obtenue à partir de deux figures planes (stéréogrammes) représentant le même motif mais adéquatement décalées pour créer la disparité qui sera traitée par le système visuel et interprétée comme une figure en relief (Fig 20b). Ces techniques de reconstitution artificielle du relief à partir de deux images sont utilisées en particulier dans les nouveaux dispositifs à base d'écrans (soit deux écrans soit un écran avec entrelacement de l'information pour chaque oeil). Cependant, compte tenu des valeurs limites des disparités mises en jeu, l'utilisation des indices binoculaires de la perception du relief nécessite des écrans de plus haute résolution que ceux utilisés en mode classique où seuls les indices monoculaires peuvent intervenir.

VIII. CONCLUSION

Le canal visuel joue un rôle prépondérant pour l'accès à l'information. Alors qu'initialement les recherches en psychophysique visuelle s'intéressaient principalement à la mesure des performances, les travaux de ces vingt dernières années ont permis de définir les propriétés de filtrage spatial, temporel et chromatique du système visuel et d'élaborer des modèles de reconnaissance des formes, de vision colorée et de vision du relief.

Dans les systèmes de visualisation où l'on prend en compte les performances visuelles et les critères de tolérance de dégradation d'image, on constate des améliorations notables en matière de confort et d'acceptabilité des dispositifs. En ce qui concerne l'ingénierie de l'image - acquisition, traitement et affichage - l'utilisation des courbes de filtrage et la mise en oeuvre des différents modèles de vision proposés améliorent le codage de l'information par une augmentation très sensible des taux de compression des données image.

REFERENCES

- /1/ FLAMANT, F, *Revue Opt. Théor. Instrum.* **34** (1955) 433.
- /2/ ARNULF, A, DUPUY, O. C. R. *Hebd. Scéanc. Acad. Sci.* **250** (1960) 2757.
- /3/ CAMPBELL, F.W., and GUBISCH, R.W., *J. Physiol. Lond.* **186** (1966) 558.
- /4/ CHARMAN, W.N., dans *Progress in Retinal Research*, ed. Osborne, N, et Chader, G, Pergamon Press Oxford **2** (1983) 1.
- /5/ MORGAN, M.W., *Am. J. Optom.* **21** (1944) 183.
- /6/ TOATES, F.M., *Physiol. Rev.* **52** (1972) 828.
- /7/ DENIEUL, P, *Vision Res.* **22** (1982) 561.
- /8/ RODIECK, R.W., *The Vertebrate Retina, Principles of structure and function*, W.H. Freeman and Company, San Francisco (1973).
- /9/ BASTIE, J, *Radiométrie - Photométrie*, dans *Techniques de l'Ingénieur R 3 330* (1974) 1.
- /10/ LE GRAND, Y, *Optique Physiologique : Lumière et Couleur II*, Masson, Paris (1972).
- /11/ SCHADE, O.H., *J. Opt. Soc. Am.* **46** (1956) 721.
- /12/ MARR, D, *Vision : A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, W.H. Freeman and Company, San Francisco (1982).
- /13/ RODIECK, R.W., *Vision Res.* **5** (1965) 583.
- /14/ MONOT, A, CHIRON, A, COTTIN, F, BOURDY, C, *J. Fr. Ophtalmol.* **3** (1986) 199.
- /15/ CAMPBELL, F.W. and ROBSON, J.G., *J. Physiol. Lond.* **197** (1968) 551.
- /16/ WILSON, H.R., Mc FARLANE, D.K. and PHILLIPS, G.C., *Vision Res.* **23** (1983) 873.
- /17/ MAFFEI, L, FIORENTINI, A, *Vision Res.* **13** (1973) 1255.
- /18/ HUBEL, D.H., WIESEL, T.N., *Nature* **221** (1969) 747.
- /19/ WILSON, H.R., GELB, D.J., *J. Opt. Soc. Am. A* **1** (1984) 124.
- /20/ BRETTTEL, H, CAELLI, T, HILZ, R, RENTSCHLER, I, *Human Neurobiol.* **1** (1982) 61.

- /21/ GINSBURG, A.P., Proceedings of the SID 21/3 (1980) 219.
 /22/ Commission Internationale de l'Eclairage, Publication CIE N° 19/2 (TC-3.1), Paris (1981).
 /23/ DE LANGE, H, J. Opt. Soc. Am. 48 (1958) 777.
 /24/ KULIKOWSKI, J.J., TOLHURST, D.J., J. Physiol. Lond. 232 (1973) 149.
 /25/ ROBSON, J.G., J. Opt. Soc. Am. 56 (1966) 1141.
 /26/ KELLY, D.H., J. Opt. Soc. Am. 61 (1971) 537.
 /27/ Commission Internationale de l'Eclairage, Publication CIE N° 15-2, Vienne (1986).
 /28/ CORNO-MARTIN, F, Colorimétrie, dans *Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle*, R 6440 (1990) 1.
 /29/ BRETTEL, H, Image Processing II SPIE 1027 (1988) 107.
 /30/ HUNT, R.W.G., *Measuring Colour*, Ellis Horwood, Chichester (1987).
 /31/ DARTNALL, H.J.A., BOWMAKER, J.K., MOLLON, J.D., Proc. R. Soc. Lond. B 220 (1983) 115.
 /32/ MAC ADAM, D.L., J. Opt. Soc. Am. 32 (1942) 247.
 /33/ JUDD, D.B., WYSZECKI, G, *Color in Business, Science and Industry*, Wiley and Sons, New York (1975).
 /34/ ZRENNER, E, *Neurophysiology Aspects of Color Vision in Primates*, Springer Verlag, Berlin (1983).
 /35/ NAYATANI, Y, TAKAHAMA, K, SOBAGAKI, H, HASHIMOTO, K, Color Res. Appl. 4 (1990) 210.
 /36/ HUNT, R.W.G., Color Res. Appl. 3 (1991) 146.
 /37/ LIVINGSTONE, M.S., HUBEL, D.H., J. Neuroscience 4 (1984) 309.
 /38/ SHIPP, S, ZEKEI, S, Nature 315 (1985) 322.
 /39/ GUTH, S.L., J. Opt. Soc. Am. A 8 (1991) 976.
 /40/ BOURDY, C, J. Optics 20 (1989) 243.

OUVRAGES GENERAUX DE REFERENCE.

- OGLE, K.N., *Researches in Binocular Vision*, W.B. Saunders Company, Philadelphia (1950).
 LE GRAND, Y, *Optique Physiologique, I La Dioptrie de l'Oeil et sa Correction* (1964), **II Lumière et Couleur** (1972), **III L'Espace Visuel** (1956), Masson, Paris.
Handbook of Sensory Physiology, VII/4 Visual Psychophysics, eds. Jameson, D, Hurvich, L, (1972), **VIII Perception**, eds. Held, R, Leibowitz, H.W., Teuber, H.L., (1978), Springer Verlag.
 RODIECK, R.W., *The Vertebrate Retina, Principles of structure and function*, W.H. Freeman and Company, San Francisco (1973).
 OVERINGTON, I, *Vision and Acquisition : Fundamentals of Human Visual Performance, Environmental Influences and Applications in Instrumental Optics*, Pentech Press, London (1976).
The Senses, eds. Barlow, H.B., Mollon, J.D., Cambridge University Press (1982).
 WYSZECKI, G, STILES, W.S., *Color Science : Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, Wiley and Sons (1982).
Vergence Eye Movements : Basic and Clinical Aspects, eds. Schor, C.M., Ciuffreda, K.J., Butterworths, Boston (1983).
Handbook of Perception and Human Performance, 2 vol., ed. Boff, K.R., Kaufman, L, Thomas, J.P., Wiley and Sons (1986).
 BUSER, P, IMBERT, M, *Vision*, Herman, Paris (1987).
 Commission Internationale de l'Eclairage, *Vocabulaire International de l'Eclairage*, Publication CIE N° 17.4 Genève (1987).
 HUNT, R.W.G., *Measuring Colour*, Ellis Horwood limited, Chichester (1987).
 KOWALISKI, P, *Vision et Mesure de la Couleur*, 2ème édition actualisée par Viénot, F, Sève, R, Masson, Paris (1990).