

J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes,
Volume 3, Hors-Série 1, 1 (2004)
DOI : <http://dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2004601>
© EDP Sciences, 2004

La vision

C. Corbé

Institution Nationale des Invalides
6, boulevard des Invalides
F-75700 Paris 07 SP, France

La Vision

Ch. CORBE

Professeur de Physiologie Sensorielle
Institution Nationale des Invalides
6, boulevard des Invalides
75 700 Paris 07 SP

1. INTRODUCTION

La vision est un mécanisme complexe qui ne révèle toutes ses facettes que lorsque l'œil est malade. Les découvertes récentes en neurosciences ont permis de mieux comprendre son mécanisme.

2. PRINCIPE DE BASE

En préambule rappelons une notion fondamentale et même essentielle : il n'y a de vision que s'il y a de la lumière. La lumière n'a pas de signification en elle-même, mais pour le contenu qu'elle apporte à l'être vivant, c'est-à-dire le savoir et l'action. L'optique oculaire n'a d'autres buts que de transporter sur la rétine une image de qualité suffisante, pour que le cerveau puisse décoder les messages sur un programme préétabli, au fonctionnement appris.

Pour avoir un « bon œil », il est nécessaire que ce capteur possède des structures saines et normales, fonctionnant convenablement et surtout que l'ensemble du système soit adapté aux besoins du sujet. L'œil est un capteur actif des informations nécessaires à toute personne pour communiquer avec son environnement. Celles-ci, contenues dans le flux lumineux, doivent traverser les milieux transparents pour être déposées au niveau de la rétine et transmises ensuite aux aires cérébrales supérieures. Pour ce faire, l'œil doit d'abord agir en tant qu'instrument d'optique, puis en tant que système informatique d'encodage et d'enregistrement des données, enfin en tant que système de synthèse pour élaborer une solution appropriée à une situation donnée.

3. ŒIL COMME INSTRUMENT OPTIQUE.

L'œil humaine est un système sophistiqué qui, comme tout instrument optique, présente un pouvoir séparateur, conditionnant l'acuité visuelle et la performance sensorielle. Or, divers paramètres de nature physique se combinent à la physiologie de la pupille et à celle de l'accommodation pour influencer la résolution de l'œil. On relève des phénomènes dus au rayonnement lumineux lui-même ; des phénomènes engendrés par la structure des milieux transparents ; des phénomènes induits par la nature dynamique et donc fluctuante de l'organe.

A. Phénomènes induits par le rayon lumineux.

La nature ondulatoire de la lumière va contribuer à ce que la synthèse optique de l'œil donne d'une source lumineuse ponctuelle une image, qui elle, ne le sera pas. Cette image sera plutôt un disque lumineux, une tâche de diffraction, entourée d'anneaux moins brillants, dont le maximum d'éclairement sera d'autant plus important que la pupille est petite. En clair, plus la pupille est dilatée, meilleure est l'acuité visuelle. Ainsi, le calcul de la limite de résolution effectuée pour une longueur d'onde de 555 nm donne une acuité de l'ordre de 15/10 (45C/deg) pour un diamètre pupillaire de 3 mm, 20/10 (60c/deg) pour 5 mm, 30/10 (90c/deg) pour 7 mm.

En définitive, le critère d'optimisation moyen de correction visuelle chez l'adulte est de l'ordre de 15/10 avec une ouverture pupillaire de 2,5 à 3 mm.

B. Phénomènes induits par la structure des milieux transparents.

L'œil optique naturel, destiné à transmettre le spectre électromagnétique, est un organe « bourré » d'imperfections.

B.1. Aberrations.

En 1981 Helmholtz déclare que si un opticien se présentait à lui avec un système optique porteur de tous les défauts de l'œil, il traiterait cet opticien d'incapable. Les imperfections sont constituées par les aberrations. Celles-ci sont décrites depuis longtemps et absolument reconnues. Cinq sont dites géométriques, car elles existent pour chaque couleur du spectre, et le chromatisme déplace les tâches pour chaque couleur, provoquant parfois un aspect de drapeau.

- C'est ainsi que l'aberration sphérique découle des caractéristiques géométriques des dioptries oculaires. Elle introduit dans l'image rétinienne un flux symétrique centré sur l'image fovéale.
- La coma, résulte de l'absence de coaxialité des dioptries ou du décalage du diaphragme par rapport à l'axe optique du système. Or, dans l'œil, la notion d'axe optique est approximative et la pupille tend à se décentrer lorsqu'elle se dilate. On peut donc s'attendre à ce que la coma affecte l'optique oculaire physiologique.

- L'astigmatisme dans laquelle l'inégalité de courbure de dioptries oculaires fait que l'image d'un point n'est pas un point mais une surface.
- La courbure de champ, défaut de puissance oblique, en ophtalmique.
- La distorsion, qui ne fait que déplacer l'image et n'a pas d'influence au centre.

Une aberration importante est aberration chromatique. L'œil ne focalise sur la rétine qu'une longueur d'onde à la fois. Les autres longueurs d'ondes sont vues floues. Ce phénomène est cependant indispensable dans l'accommodation dont il représente un élément de contrôle.

Cependant, les différentes mesures des aberrations optiques de l'œil qu'elles sont minimales sur les 2 à 3 mm de la zone centrale de la pupille, l'œil se comportant alors comme un système optique parfait, limité seulement par la diffraction. En présence d'une pupille plus grande, il existe une grande variabilité des aberrations d'un sujet à l'autre.

B.2. Autre phénomène.

La diffusion de la lumière est un autre défaut qui n'est pas suffisamment pris en compte en pratique quotidienne, pour la bonne raison que ce paramètre est tout à fait compatible avec une acuité à 10/10. En revanche, elle altère la sensibilité aux contrastes et par la même ampute fortement la capacité visuelle au fur et à mesure de l'avancée en âge. La diffusion peut être comparée, d'une manière imagée, au bruit de fond qui accompagne le son. Elle a pour effet de modifier la distribution de l'éclairement de l'image rétinienne d'un point. Elle provient pour partie de la cornée, pour partie du cristallin et pour partie de la rétine elle-même par les réflexions qui s'y produisent.

B.3. Phénomènes induits par la nature dynamique de l'organe.

Enfin, le système optique est un élément dynamique et non statique du fait du micronystagmus des globes et des micros-fluctuations de l'accommodation. De ce fait, les mesures fonctionnelles et les corrections apportées, la plupart du temps en statique, n'ont qu'une valeur relative pour la vie courante.

4. VERS UNE AMÉLIORATION DE L'INSTRUMENT OPTIQUE ŒIL.

L'imperfection due aux aberrations du système optique peut se classer ainsi :

- les aberrations aux bas degrés. En fait ce sont les aberrations les plus importantes que nous sachions traiter par correction du défocus (myopie, hypermétropie, astigmatisme).
- les aberrations de haut degré qui représentent un certain nombre d'anomalies mais d'importance infime pour un œil normal (0,5 dioptrie au grand maximum). Les corrections (pour un œil normal) sont négligeables, malgré leur qualificatif.

Certaines aberrations sont nécessaires à la vision, comme l'aberration chromatique, dont le rôle est essentiel pour l'accommodation, ainsi que l'aberration sphérique qui présente l'avantage d'augmenter la profondeur du champ et d'harmoniser la liaison optique-rétine.

Basé sur le principe de transfert du front d'onde lumineux à travers les milieux transparents, plusieurs systèmes analyseurs d'aberrations ont été mis au point. Le plus répandu et le plus facile d'utilisation est l'appareil de Hartmann-Schack.

En fait son rôle est surtout essentiel quand il s'agit de traiter une cornée pathologique. Il sera utile dans le positionnement des greffons cornéens, le traitement des kératocones, le traitement des aberrations induites par lasik, le positionnement des cristallins artificiels, etc. contrairement à l'effacement des aberrations sur un œil normal qui n'amène qu'un gain minime.

5. DE L'ACUITÉ VISUELLE À LA COGNITION.

A. La chaîne neurorétinienne.

L'acuité visuelle exprime la valeur du pouvoir séparateur des cônes rétinien. Or, en 1966, Enroth-Cugell et Robson établissent qu'il existe des groupes cellulaires neuro-rétiniens fonctionnellement indépendants, uniquement actifs aux différences de luminance et sensible spécifiquement à un composant du spectre lumineux, constitué d'une organisation spatiale, temporelle et énergétique (longueur d'onde). Ce sont les champs récepteurs de ces contrastes de luminance spécifique. Les champs récepteurs sont constitués d'entités cellulaires dont la base est la cellule ganglionnaire, début de la fibre optique. Il s'agit véritablement de canaux d'analyse qui prennent en charge un élément spécifique de l'image. Ainsi, il existe un canal traitant l'information relative à la perception des formes (champs récepteurs de fréquences spatiales), une autre la perception des mouvements (champs récepteurs de fréquences temporelles), un autre pour la perception des couleurs (champs spécifiques des dualités lumineuses colorées). Ces canaux (éléments cellulaires connectés) conduisent en parallèle les caractéristiques énergétique du spectre électromagnétique réfléchi sur l'image ou l'objet. Ainsi, l'information visuelle n'est pas traitée par un système hiérarchique unique, mais par plusieurs systèmes, dont les propriétés sont différentes (l'illustration de cette constitution histologique apparaît nettement chez un patient atteint de DMLA).

Ces entités fonctionnelles sont réparties de manière structurée permettant de distinguer une vision périphérique d'une part et une vision centrale d'autre part, dont le rôle est d'égale importance et absolument complémentaire. La vision périphérique a un rôle de détection rapide, supporté par les champs récepteurs de fréquences temporelles, ainsi que ceux des basses fréquences spatiales. La vision centrale a un rôle d'analyse détaillée, supportée par les champs récepteurs des hautes et moyennes fréquences spatiales.

La rétine se comporte en fait comme un micro-ordinateur très puissant qui décompose toutes les images

projetées sur elle en une somme de réseaux sinusoïdaux ayant un contraste variable. L'aptitude à percevoir les objets dépend des facultés du système visuel à discerner les contrastes, c'est-à-dire, des différences de luminance entre les surfaces adjacentes de ces réseaux élémentaires. Si l'on mesure la luminance d'une scène visuelle quelconque sur une ligne horizontale, le niveau lumineux indiqué par le photomètre varie en fonction des structures rencontrées.

En clinique cette capacité fonctionnelle est analysée par la fonction de sensibilité au contraste de luminance plus communément appelée : vision des contrastes. Cette fonction exprime les capacités du système visuel à détecter les différences de luminance sur des éléments de dimensions variées. La fonction dessine l'enveloppe du domaine spatial visible par l'ensemble du système ainsi que ses possibilités de discrimination du contraste.

L'examen de sensibilité au contraste consiste, en clinique, à tester la perception des réseaux sinusoïdaux qui sont les seuls stimuli réellement perçus par le cerveau. La transformation de l'image en une somme de réseaux doit obéir à certaines lois mathématiques. Il faut qu'à toute image corresponde une seule distribution (spectre fréquentiel) de réseaux et qu'à un spectre fréquentiel corresponde une seule image. L'analyse de Fourier (procédure de décomposition d'une structure en ses composants sinusoïdaux) appliquée à l'étude des fréquences spatiales, permet au cerveau non seulement de reconstituer une image, mais aussi de la comprendre, ce qui est le but ultime des aires visuelles.

La technique se situe parmi les techniques psychophysiques mesurant les capacités de transduction de l'environnement physique au niveau sensoriel. La fonction de sensibilité au contraste est l'enveloppe qui englobe l'ensemble de processus de détection et de discrimination des réseaux. Elle dessine la limite du domaine visible capté par l'ensemble du système visuel, c'est l'enveloppe de vision.

La variation de la discrimination du contraste diminue l'enveloppe de vision. Il ne s'agit pas uniquement d'une moins bonne discrimination du contraste, mais d'une diminution de l'enveloppe de vision, donc d'une diminution de la capacité visuelle globale de discrimination spatio-temporelle. Celle-ci peut être calculée et les dommages estimés en pourcentage par rapport à une enveloppe de vision normale. L'analyse permet de déterminer si un objet, une structure physique, une image est adaptée à la perception du sujet. De plus, en fonction des éléments contenus dans l'image, il est possible de savoir comment celle-ci sera perçue. A l'intérieur de l'enveloppe de vision, sous tendue par la courbe de sensibilité aux contrastes, trois zones sont globalement à considérer :

- la zone des basses fréquences spatiales, domaine d'analyse grossière,
- la zone des moyennes fréquences spatiales, domaine d'analyse des formes globales,
- la zone des hautes fréquences spatiales, domaine d'analyse des détails fins.

Lorsqu'un sujet subit une intervention de chirurgie réfractive, la méthode analytique par la détermination de l'aire visible sous la courbe de sensibilité au contraste

permet d'apprécier la surface de vision qu'il peut balayer dans l'environnement.

Ainsi, l'analyse morphoscopique se fait dès le niveau rétinien et la détermination de l'acuité visuelle n'est qu'un aspect, car il s'agit uniquement du pouvoir de discrimination le plus fin, à contraste maximal. L'acuité mesurée en fait le plus petit élément susceptible de stimuler deux cônes, alors que dans le cas de la fréquence spatiale, est évalué le nombre d'éléments physiques contenu dans le flux lumineux entrant dans l'œil, ce qui est plus informatif.

Enfin, la disposition histologique des cellules rétiniennes et en particulier l'écartement des cônes ne peut intégrer que 60c/deg, soit 20/10° au maximum. De ce fait, seule, une mutation génétique ou une greffe de photorécepteurs serait susceptible d'apporter une discrimination plus fine.

B. La stratégie de vision.

Si les modalités de la fonction de transfert sont relativement bien connues, l'utilisation des « images transférées » est plus complexe, mais donne toute sa valeur au phénomène de vision.

C'est ainsi que la vision représente le traitement d'un grand nombre de stimuli qui se manifestent sous des conditions diverses et variées, de jour comme de nuit, en vision de loin, de près, intermédiaire, dans les trois directions de l'espace, en vision centrale ou périphérique et sous des échéances temporelles contraignantes. Plus que l'acuité visuelle, le système visuel se sert de facteurs d'identification plus généraux.

Dès le jeune âge, le système adapte son fonctionnement en changeant en permanence et spontanément le type et les caractéristiques du traitement de l'information en fonction de la stimulation proposée. Les travaux de Y. Grall et Fr. Le Gargasson sur l'ophtalmoscopie laser à balayage (SLO) le confirment. Ils ont montré tout d'abord que l'essentiel des traitements effectués par le système visuel portent sur des mesures différentielles et non absolues des grandeurs physiques de la stimulation. Quelques éléments sont à retenir plus pertinents :

- un sujet peut utiliser quasiment simultanément, plusieurs aires de fixation ;
- la position de la fovéa lors de l'exploration d'une scène visuelle dépend de la présence d'éléments attractifs, du lieu de projection de ces éléments sur la rétine, de l'apprentissage durant les premières années de vie et de facteurs innés.

C. Traitement séquentiel.

L'information provenant de la rétine et destinée à l'aire corticale VI circule selon trois vagues successives qui font relais dans trois régions séparées du corps genouillé latéral (CGL).

La première vague envahit les couches magnocellulaires (M) du CGL. Il s'agit d'une information qui privilégie les transitoires dans le domaine temporel (haute vitesse, apparition soudaine d'objets), qui possède

une faible résolution dans le domaine spatial et ne concerne pas la couleur.

La seconde vague d'activation, décalée de vingt millisecondes par rapport au M concerne les couches parveau-celulaires (P) et transmet une information colorée et de haute résolution spatiale.

La troisième vague d'activation décalée encore de 10 millisecondes correspondant aux couches konio-celulaires (K) dont on connaît peu de choses sur le plan fonctionnel.

A partir des aires V1 et V2, on distingue des grands ensembles d'aires corticales : les aires de la voie dorso-pariétale et celles de la voie ventro-temporale. Ces deux ensembles jouent des rôles différents dans le traitement de l'information visuelle.

La voie dorso-pariétale traite l'information concernant le mouvement et la position des objets dans l'espace et joue un rôle essentiel dans la coordination visuo-motrice. La voie ventro-temporale est indispensable pour la reconnaissance d'objets. La voie dorso-pariétale est activée presque exclusivement par le canal M alors que la voie ventro-temporale est activée de façon successive par les canaux M, P et K. selon ce modèle, l'information transférée par la voie M envahit rapidement l'ensemble des aires corticales. Cet envahissement est particulièrement rapide dans la voie dorso-pariétale du fait de la présence de nombreuses fibres myélinisées. Dans la voie ventro-temporale, l'arrivée de l'information de type M sert à activer des représentations stockées à différents niveaux des aires du cortex temporal. Il s'ensuit des interactions avec une information plus précise et colorée qui est transmise par la voie P.

D. Représentation corticale des images.

La représentation visuelle est projetée systématiquement sur le corps genouillé latéral et sur la partie occipitale du cortex qui modifie profondément l'information qui lui parvient. En outre, de tous les lobes du cerveau, le lobe occipital est le plus richement pourvu de fibres d'associations longues qui assurent la liaison avec des centres cérébraux sous tendant des activités différentes.

Hubel et Wiesel ont distingué deux types cellulaires principaux, les cellules simples et les cellules complexes.

- 1 – Les cellules simples véhiculeraient préférentiellement l'information spatiale,
- 2 – Les cellules complexes sont sensibles à la transmission temporelle.

Le cerveau a logiquement évolué de façon à minimiser le nombre de cellules nécessaires au traitement de l'information. LA seule information pertinente dont il a besoin concerne les limites d'une forme. Il est difficile de concevoir que l'intérieur d'une forme n'active pas les cellules du cerveau. Nous percevons l'intérieur d'une forme uniquement grâce aux cellules sensibles aux contrastes entre les zones d'intensités lumineuses différentes. Une forme dont l'intérieur est uniformément éclairé est analysée grâce à la seule activation des cellules dont le champ récepteur détecte les bords de cette forme. Les cellules dont le champ récepteur est à l'intérieur de celle-ci ne sont pas

activées, car leur activation signifierait que l'intérieur n'est pas uniformément éclairé.

Le traitement du signal suit, en fait, trois étapes ou niveaux. Ce parcours permet en partant des impacts photoniques rétinien d'aboutir à une compréhension de la scène visuelle :

Le traitement sensoriel correspond à l'encodage du stimulus physique à partir de l'image rétinienne jusqu'au cortex visuel.

Le traitement perceptif aboutit à une forme sémantique à partir des données de l'encodage sensoriel. Il aboutit à la perception d'une forme sans que ses propriétés fonctionnelles et sémantiques aient pu être définies. A ce niveau, interviennent les phénomènes de groupement de points en ligne. Les attributs primitifs codés lors de l'étape sensorielle sont assemblés par groupement et colinéaire. Dès cette étape serait réalisé le traitement local et global de l'information, la priorité étant laissée à l'information globale (fréquences spatiales basses) sur l'information locale (fréquence spatiales hautes) (percevoir la forêt avant les arbres).

Le traitement cognitif correspond à l'identification de l'objet à partir de l'information de forme acquise lors de l'étape perceptive. A ce niveau, la représentation est indépendante des formes. Elle est dite prototypique et s'effectue à partir d'un stock de formes sémantique en mémoire.

6. L'ETAPE COGNITIVE.

La vision conduit à l'interprétation de la chose vue et pour se faire la tâche d'analyse est hiérarchisée avec identification, description, jugement relatif, appariement, tri ou classement, utilisation de la mémoire immédiate, pratique d'un raisonnement logique. En fait, le cerveau reçoit en permanence des informations des différents capteurs sensoriels, simultanément pour chaque acte « d'information- décision ». Les informations convergent vers les centres nerveux où elles sont alors intégrés et une réponse cohérente, unique, homogène est alors élaborée.

Les aires cérébrales supérieures stockent en mémoire chaque information suivant un modèle de processus. Les premiers captages des stimuli sont destinés à un archivage exhaustif. Au fur et à mesure des nouvelles stimulations identiques, le mécanisme travaillera à l'économie et ne prendra en compte qu'un élément du fichier mémoire. Un autre effet de la reconnaissance des objets et des images est basé sur l'éducation et le développement psychologique de chaque individu qui peut à partir de la même information constituer une interprétation différenciée voire contraire.

7. EN DEFINITIVE : QU'EST DONC LA VUE ?

La vue est le mécanisme qui assure la détection d'une information ou d'un stimulus. Elle se basera sur le champ visuel, l'oculomotricité avec ses saccades et sa poursuite, l'analyse primaire des stimuli par les champs récepteurs de luminance permettant de définir d'une manière basale et grossière un élément morphoscopique dans sa gamme de

hautes, moyennes, basses fréquences spatiales et temporelles, la vision colorée, le sens lumineux, etc...

A. Qu'est donc la vision ?

La vision est plaquée sur la vue et procède à des remaniements de l'information par filtration active, positive ou négative, faisant intervenir les mécanismes centraux de l'attention pour situer l'information dans son contexte avec la potentialisation ou la pondération des messages transmis par les autres capteurs.

En fait, la vision correspond au traitement d'informations pertinentes pour la vie quotidienne avec la reconnaissance des objets, des visages, des signaux routiers, dans l'interprétation correcte des scènes visuelles. Les stimuli sont complexes, formés de lettres, de figures géométriques, d'un ergogramme de cibles attractives ou distrayantes. Le système visuel se sert de facteurs d'identification particulières que sont la différence de luminance entre deux objets, leur taille, leur forme, leur orientation. A ce niveau plusieurs interrogations sont encore sans réponse. Est-ce que le système visuel utilise plus d'informations de forme ou de surface, ou de taille ou de luminance pour discriminer le signal ? Est-ce qu'un sujet groupe les éléments de scène visuelle dans un fond diffus pour isoler la cible ? Quelles sont les caractéristiques physiques optimales utilisées par un sujet pour présenter des interactions avec l'environnement ?

B. Comment utilise-t-on la vision ?

Dans les conditions de relation normale avec le milieu environnant pour la reconnaissance de forme ou d'objets ou pour une activité motrice définie, les capteurs sensoriels ne fonctionnent qu'à 40% de leur possibilité. L'utilisation maximale de la recherche de stimuli peut s'appréhender dans des conditions particulières que l'on pourrait qualifier de vision des extrêmes.

Les sportifs de haut niveau, les pilotes de chasse ou les spationautes mobilisent leur vision active dans la totalité des composantes pour amener le maximum d'informations au niveau cérébral, afin de pallier un danger vital potentiel non reconnu antérieurement. Dans ce cas, l'utilisation maximale du capteur visuel et sensoriel conduit à une attention maximalisée qui permet de reconnaître des éléments ou des cibles de la scène visuelle non captée en situation banale. A l'inverse, des sujets déficitaires visuels vont, pour la reconnaissance de l'environnement, mettre en œuvre des canaux analyseurs centrés sur les basses et moyennes fréquences spatiales, compensant de façon efficace l'information représentée par l'analyse des hautes fréquences.

Une vision exacerbée pourrait peut être se comparer aux sujets doués de l'oreille absolue. Ceux-ci savent identifier la hauteur absolue des sons qu'ils entendent. Cette capacité est rare (1/10000). Elle est plus fréquente chez les musiciens encore que bon nombre d'entre eux disent ne pas la posséder (Wagner, Tchaikowski, ...) et que médiocres musiciens la présentent. Une étude morphométrique récente

entomodensito-métrique par émission de positions montre que chez certains musiciens dotés de l'oreille absolue, l'aire auditive associative est nettement plus développée que chez des non musiciens ou ceux privés de ce don. Par comparaison, des études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, nous montreront peut être que certains sujets peuvent utiliser au maximum les informations visuelles contrairement à d'autres.

N'oublions pas non plus que le changement de performance dans l'optimisation de l'analyse de l'information peut être du à un entraînement. Les études ont montré que le bénéfice de l'entraînement met en jeu tous les niveaux du traitement perceptif et cognitif. Au cours des vingt dernières années, les études sur l'apprentissage perceptif ont été conduites sur des stimuli et des tâches simples incluant l'acuité visuelle, la texture de fond, la discrimination d'orientation, la direction du mouvement. Dans toutes ces tâches, la performance s'est améliorée avec l'entraînement. Mais, l'effet de celui-ci est très sélectif, soit en privilégiant l'orientation ou la fréquence spatiale ou la direction du mouvement, etc... En fait, l'entraînement reflète une amélioration des stratégies de recherche et de la capacité à extraire des informations pertinentes pour l'action menée.

8. CONCLUSION.

La vision est un mécanisme sensoriel et cérébral complexe où la discrimination de formes fines ne représente qu'un élément minime et peu utilisé dans la pratique quotidienne. L'expressivité réelle de la vision se fait au niveau des aires cérébrales supérieures par analyse comparative de tous les paramètres sensoriels. L'éducation, la mémoire, l'entraînement joueront un rôle essentiel. En définitive, l'œil n'est pas l'acuité visuelle, mais un capteur sensoriel parmi les autres et surtout spécifique à une personne particulière.

9. BIBLIOGRAPHIE.

Artal, P., Towards super-vision : facts and fiction, Point de Vue, N°46, 3-16

Campbell, F.W., Green, D.G., Optical and retinal affecting visual resolution ; J. Physiology, London, 1965, N° 181, 576-593

Corbé, Ch., Jacquelin, P., Pedepat, P., Aircrew fitness decisions and advances in refractive surgery techniques, German J. Ophthalmology, 1993, N°2, 146-149

Corbée Ch., Menu, J.P., Fighters pilots and low vision, Bull. Acad. Nationale de Médecine, 1997, 181, 7, 1297-1305

Dakin, S.C., Mareschal I., sensitivity to contrast modulation depends on carrier spatial frequency and orientation, Vision Res., 2000, 01, 40:3, 311-329

- De la Marnierre, E., Baltenneck, A., Corbé, Ch., Morphoscopic perception at variable contrast and luminance levels in 97 subjects, *Canadian J. Ophthalmology*, 2000, 02, 35 : 1, 5-11
- Enroth-Cugell, C., Robson, J.G., The contrast sensitivity of the retinal ganglion cells of the cat, *J. Physiology*, London, 1966, 187, 517-552
- Hazel, C.A., Petre, K.L., Armstrong, R.A., Benson, M.T., Frost, N.A., Visual fonction and subjective quality of life compared in subjects with acquired macular disease, *Investigations of Ophthalmology in Visual Sciences*, 2000, 05, 41 : 6, 1309-1315
- Hubel, D., L'oeil, le cerveau et la vision ; Pour la Science, Belin, 1994
- Ingster-Moati, I., Test statique de sensibilité au contraste, Thèse, Université d'Auvergne, 1995
- Jeannerod, M., The representing brain, Neural correlates of motor intention and imagery, *Behavioural Brain Sciences*, 1995, 17, 187-245
- Le Gargasson, J., Gauthier, V., Rigagudière F., Grall, Y., Rings fixation with SLO : second saccade depends on first saccade, *Investigation of Ophthalmology Vision Sciences*, 1997, 38, 4, 3059, S653
- Lundh, B.L., Gottvall, E., Central and peripheral contrast sensitivity for dynamic sinnoïdal gratings in early glaucoma, *Acta Ophthalmologica*, 1995, 73, 3, 202-206
- Mellet, E., Petit, L., Tzourio, N., Mazoyer, B., Neuroanatomie fonctionnelle de la vision et de l'imagerie mentale, *Les séminaires ophtalmologiques d'IPSEN*, tome 10 « Vision génome et cerveau », Irvin ed. Paris, 1999, 5-21
- Shade, O.H., Optical and photoelectric analog of the eye, *J. Opt. Soc. Am*, 1956, 46, 721-739
- Simonet, P., Visual acuity : physical and physiological bases, *Points de Vue*, N°45, 2001, 3-17
- Seiler, T., Kaemmerer, M., Mierdel, P., Krimbe, H.E., Ocular optical aberrations after photorefractive ketatectomy for myopa and myopic asitgmatis, *Arch. Ophthalmology*, 2000, 01, 118 : 1, 17-21
- Tomatis, A., L'oreille et la vie, Robert Laffont, Paris, 1977-1990
- Verstichel, P., LA reconnaissance des visages et ses anomalies, *Bulletin de documentation*, N° 554-8, 2001, 83-92
- Williams, D., R., Aliasing in foveal human vision, *Vision Res.*, 25, 195-205, 1985
- Willis, A., Smallaman, H.S., Harris, J.M., Comparing constrast – modulated and luminance-modulated masking: effects of spatial frequency and phase, *Perception*, 2000, 01, 29 : 1, 81-100
- Zanlonghi, X., Sensibilité au contraste spatial et âge, *Bull. Soc. Ophthalmologie Française*, 10, 921-926