

THÈSE DE DOCTORAT
Immersion Visuelle Hyper-réaliste et
multi-sensorielle 3D

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| Table des figures | 4 |
| Liste des tableaux | 6 |
| I État de l'Art : Partie Théorique | 7 |
| 1 Définition du réalisme | 8 |
| 1.1 Enjeux et problématiques | 8 |
| 1.2 Définitions usuelles | 8 |
| 1.3 Définitions dans le domaine de la Réalité Virtuelle | 9 |
| 1.4 Cadre d'étude | 11 |
| 2 Définition de la multi-sensorialité 3D | 13 |
| 2.1 Immersion | 13 |
| 2.2 Présence | 14 |
| 2.3 Proprioception | 14 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.4 | Application dans la thèse | 14 |
| 3 | Fonctionnement de la vision | 15 |
| 3.1 | Structure de l'œil | 15 |
| 3.2 | Modélisation de l'œil | 17 |
| 3.3 | Vision binoculaire | 21 |
| 3.4 | Traitement post-rétinien | 22 |
| 4 | Perception de la couleur | 26 |
| 4.1 | Espaces colorimétriques | 26 |
| 4.2 | Lois et effets | 28 |
| 4.3 | Observateurs standards | 30 |
| 4.4 | Illuminants | 31 |
| 4.5 | Equations de différentiations des couleurs | 32 |
| 5 | Perception visuelle de la profondeur | 34 |
| 6 | Contraste | 37 |
| 6.1 | Définitions mathématiques | 37 |
| 6.2 | Lois de comportement | 38 |
| 7 | Influences Physiologiques | 40 |
| 7.1 | Variations morphologiques | 40 |
| 7.2 | Âge | 43 |
| | Bibliographie | 44 |

TABLE DES FIGURES

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Illustration de bokeh | 10 |
| 1.2 | Différentes acceptations du terme <i>réalisme</i> | 11 |
| 1.3 | Cadre d'étude de la thèse | 12 |
| 3.1 | Structure de l'œil | 17 |
| 3.2 | Répartition (en <i>milliers/mm²</i>) des cônes/bâtonnets sur la rétine | 18 |
| 3.3 | Points caractéristiques (cardinaux) d'un système optique plan | 19 |
| 3.4 | Modèle et valeurs physiologiques de Gullstrand, image tirée de [Liou & Brennan, 1997] | 20 |
| 3.5 | Modèle de Liou & Brennan, image tirée de [Liou & Brennan, 1997] | 20 |
| 3.6 | Horoptères théorique et empirique, Aire de Panum et disparités rétiniennes. Image tirée de [Neveu, 2012]. | 22 |
| 3.7 | Structure et cellules composant la rétine, image tirée de [ANSES, 2014]. | 23 |
| 3.8 | Direction des voies ventrale et dorsale dans le cerveau. | 24 |
| 3.9 | Construction des canaux chromatiques et achromatique dans la théorie des processus antagoniques | 25 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.10 | Courbes moyennes de sensibilité au contraste en fonction de la fréquence spatiale du stimulus pour différentes valeurs d'acuité visuelle, tiré de [Owsley <i>et al.</i> , 1983] | 25 |
| 4.1 | Composantes de l'espace CIELAB | 27 |
| 4.2 | Répartition des domaines photopique, mésopique et scotopique | 30 |
| 4.3 | Courbes d'efficacité lumineuse des Observateurs Standards de la CIE | 30 |
| 4.4 | Spectre de l'illuminant D65 (CIE) | 32 |
| 5.1 | Indices visuels de perception de la profondeur | 35 |
| 5.2 | Illustration d'indices de profondeur : ombres (1, image tirée de [ANSES, 2014]), taille (2) et gradient de profondeur (3, images tirées de [Glassner, 1995]). | 36 |
| 7.1 | Schématisation de la différence de profondeur stéréoscopique perçue en fonction de la distance interoculaire | 41 |
| 7.2 | Abaques de la nouvelles distance perçue en fonction de la distance interoculaire | 42 |
| 7.3 | Densité des cônes en fonction de l'âge (figure tirée de [Kilbride <i>et al.</i> , 1986]) | 43 |

LISTE DES TABLEAUX

Première partie

État de l'Art : Partie Théorique

CHAPITRE

1

DÉFINITION DU RÉALISME

1.1 Enjeux et problématiques

Qu'est-ce que le réalisme ? Comment le définir ? A quoi peut-il servir ? Peut-on faire *plus* de réalisme ? A quoi cela servirait-il ? Ces questions peuvent devenir des enjeux majeurs lorsqu'elles sont associées à des cas d'application réels et de portée économique importante. Un exemple flagrant se retrouve à l'endroit du constructeur français de voitures : Renault.

Les maquettes et prototypes numériques entrent de plus en plus dans le cycle de conception des véhicules. Les simulateurs et autres systèmes d'affichage immersif sont utilisés pour visualiser ces maquettes à l'échelle 1 :1, dans des conditions d'utilisation, d'illumination et de ressemblance poussées à leur paroxysme. L'objectif est d'être le plus *réaliste* possible afin de légitimer au maximum et d'augmenter les domaines de prises de décisions dans les simulateurs.

Mais définir -et plus encore, quantifier- le *réalisme* n'est pas une tâche facile. Nous allons voir qu'il peut exister, voire coexister, plusieurs définitions applicatives du mot.

1.2 Définitions usuelles

Une fois l'évidence de la recherche de réalisme mise en avant, il devient nécessaire de définir ce qu'est le réalisme, sans quoi il serait impossible de le travailler. Tout d'abord, on peut s'intéresser à la définition que donne le Larousse ² :

2. Réalisme. (s.d.). Dans *Dictionnaire Larousse en ligne*. Repéré à www.larousse.fr/encyclopedie/divers/réalisme/8600

- Attitude qui tient compte de la réalité telle qu'elle est.
- Caractère de ce qui est une description objective de la réalité, qui ne masque rien de ses aspects les plus crus.
- Tendance littéraire et artistique du XIXe siècle qui privilégie la représentation exacte, tels qu'ils sont, de la nature, des hommes, de la société.
- Doctrine qui affirme que la connaissance du réel constitue le réel lui-même, que cette connaissance soit la seule réalité ou qu'à côté d'elle figure une autre réalité, l'objet auquel elle s'applique.

Mais ces définitions (notamment les n.3 et 4) semblent assez incomplète pour notre application car trop généraliste. Il faut s'intéresser à une définition qui soit spécifique au cadre de la réalité virtuelle (RV). Mais le *réalisme* est un terme très ambivalent et difficile à cerner [Burkhardt, 2003]. C'est ce que nous allons étudier dans la prochaine sous-partie.

1.3 Définitions dans le domaine de la Réalité Virtuelle

La première définition qui vient à l'esprit est celle de la ressemblance graphique avec le monde réel [Ferwerda *et al.*, 1996]. Est réaliste ce qui semble vrai, ce qui donne l'impression d'être vrai. On s'autorise alors l'utilisation d'un certain nombre d'artefacts graphiques (souvent issus de et popularisés par le cinéma), tel les bokehs ¹ (cf. Figure 1.1) ou le tonemapping (cf. plus bas), afin de renforcer le sentiment d'apparence réelle. Ce type de réalisme est notamment développé par et mis en avant dans le monde du jeu vidéo avec des textures de plus en plus sophistiquées, des modélisations de plus en plus fines (et donc lourdes en polygones) mais surtout des jeux de lumière et d'optique saisissants.

Une deuxième approche, moins évidente au premier abord, est décrite chez Hoorn [Hoorn *et al.*, 2003] : un environnement virtuel sera assez réaliste s'il remplit sa fonction ; si, dans le cadre d'une application d'apprentissage par exemple, ce qui doit être appris est appris. Cette définition se détache complètement d'une volonté d'un réalisme d'apparence (comme on a pu voir précédemment) et peut même se détacher d'une construction logique et/ou anthropomorphe de l'environnement virtuel. Si une scène faite de volumes géométriques colorés flottants dans un espace monochrome suffit à transmettre le message voulu, la scène est jugée réaliste.

On trouve, dans [Fuchs *et al.*, 2003], cinq acceptations du terme *réalisme* dans le domaine de la RV :

- Évaluation subjective du degré de ressemblance d'une situation.
- Fidélité de construction de la simulation aux lois de la Nature.

1. Les bokehs (terme provenant du japonais pour flou) sont des artefacts graphiques ressemblant à des taches de flou et qui prennent la forme du diaphragme de l'objectif de l'appareil de capture (caméra ou appareil photo)



FIGURE 1.1 – Illustration de bokeh

- Évaluation subjective du degré de crédibilité d'une situation.
- Fidélité psychologique.
- Illusion du réel (connue aussi sous l'appellation *présence*).

La première acceptation, l'évaluation subjective du degré de ressemblance, a déjà été décrite dans le paragraphe précédent. Elle recouvre toute la partie esthétique et artistique de la conception de l'environnement virtuel.

La deuxième acceptation, la fidélité de la simulation aux lois de la Nature, accorde moins d'importance à la beauté de la simulation qu'à son comportement simulé ; en dépit de ce que peut juger l'utilisateur. Chaque fonctionnalité implémentée se comporte en suivant un modèle issu du monde physique réel. De par le biais de perception qui peut être induit dans un monde virtuel, les comportements (comme par exemple la gravité, l'adhérence sur un sol, etc ...) et/ou les apparences (rendu des couleurs, floutage des images en fonction de la vitesse, ...) peuvent apparaître comme non naturels à l'utilisateur. Son avis n'est pas pris en compte, on se contente d'afficher des modèles rigoureux.

La troisième acceptation, est la création d'une expérience perceptive qui serait crédible, tant sur le plan microscopique (chaque élément pris à part) que sur le plan macroscopique (l'environnement virtuel dans sa globalité). Même si les informations qui sont envoyées à l'utilisateur (via l'interface de l'environnement virtuel) ne suivent pas rigoureusement les lois de la physique et du monde *réel*, il faut que l'observateur les perçoive comme étant vraies.

On peut supposer un lien fort et systématique entre cette dernière acceptation (perception crédible) et la précédente (construction objective via des modèles déterminés) mais cette question est encore grande ouverte et sujette à recherche.

Ensuite, la quatrième acceptation du terme *réalisme* est liée à une fidélité d'ordre psychologique. L'utilisateur doit se comporter de la même manière dans l'environnement virtuel

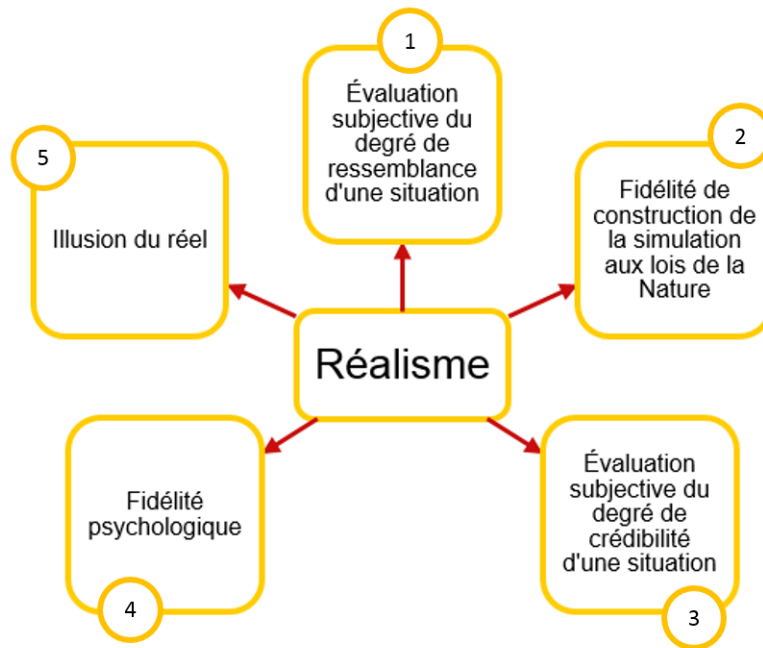


FIGURE 1.2 – Différentes acceptations du terme *réalisme*

que dans la même situation dans le monde physique. Les images affichées peuvent ne pas correspondre avec ce que l'utilisateur verrait dans la situation réelle (en fonction de la tâche à réaliser) tant que les performances et les résultats du sujet dans l'environnement virtuel sont similaires ou identiques à celles/ceux enregistré(e)s dans le monde réel. Cette acceptation est largement discutée dans la littérature [Burkhardt, 2003; Patrick, 1992; Stoffregen *et al.*, 2003].

Enfin, la cinquième et dernière acceptation fusionne les concepts de *réalisme* et de *présence*. Plus le sentiment de présence dans un environnement virtuel sera fort, plus le réalisme dudit environnement le sera aussi. La présence est "l'illusion d'une réalité qui n'existe pas" [Stoffregen *et al.*, 2003], c'est à dire le fait de faire croire au cerveau que les images/objets/personnes virtuelles que l'on voit sont en fait bien réels ou vivants [Burkhardt, 2003]. Plus la croyance en la réalité de la scène est forte, plus la présence est forte.

1.4 Cadre d'étude

Pour le cas de cette thèse, la définition du réalisme qui aura été retenue -et qui sera sous-entendue quand on utilisera le mot *réalisme* seul- est celle de la proximité physiologique avec le système visuel humain.

Le but de cette thèse n'est pas de construire de nouveaux modèles esthétiques et de travailler à l'amélioration graphiques des simulateurs (objectif qui incombe plutôt à un designer ou à un graphiste), mais plutôt de travailler sur des modèles de vision, c'est à dire

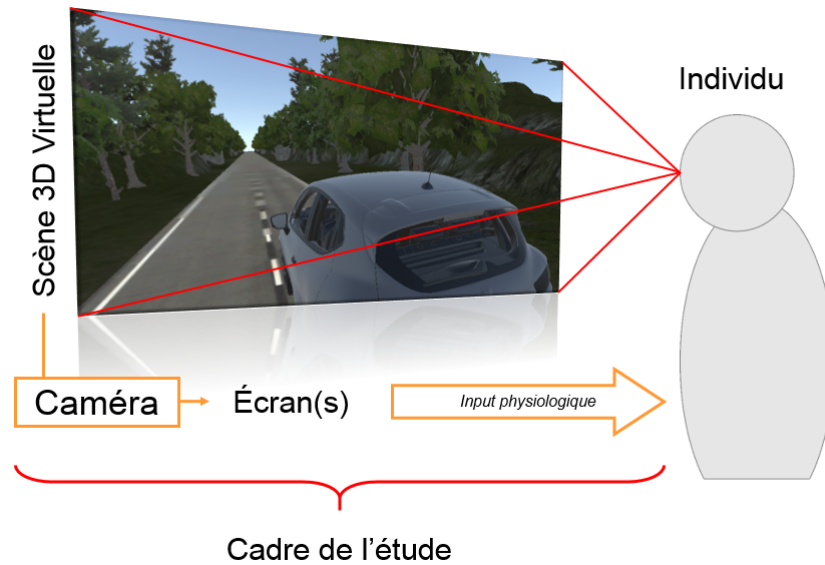


FIGURE 1.3 – Cadre d'étude de la thèse

la manière dont la caméra virtuelle va extraire les informations de la scène virtuelle -par opposition aux modèles d'affichage qui décrivent comment les informations capturées par la caméras doivent être affichées sur le(s) écran(s)- qui soient proche des facultés de la vision humaine.

Le réalisme physiologique doit, par construction et par définition, se baser sur le système visuel humain. Dans la suite de ce chapitre, nous passerons en revue un grand nombre de paradigme de la vision ; que ce soit dans la modélisation, dans le fonctionnement ou dans les différentes perceptions du monde qui nous entoure.

CHAPITRE

2

DÉFINITION DE LA MULTI-SENSORIALITÉ 3D

2.1 Immersion

Deux sémantiques coexistent : l'immersion est à la fois l'action d'immerger un utilisateur dans un environnement complètement virtuel via des images de synthèse ; mais c'est aussi l'effet (avéré ou non) qu'a cette immersion sur ce même utilisateur. De manière plus formelle, on peut dire que l'immersion est le "degré et qualité, par l'interface [d'un] système, du contrôle des entrées sensorielles pour chaque modalité de perception et d'action" (depuis [Fuchs *et al.*, 2003]).

Pour Burkhardt, [Burkhardt *et al.*, 1999], le degré d'immersion est caractérisé par un ensemble de grandeurs :

- Le sous ensemble des modalités mises en œuvre dans l'interaction.
- Les propriétés des dispositifs d'interaction pour chacune des modalités visées (degré de complétude, qualité, paramètres du signal, ...)
- La cohérence interne et la latence globale de l'information et des réactions délivrées en temps réel par le système.
- Les propriétés physiques de l'environnement physique dans lequel se déroule l'expérience.

2.2 Présence

qsd

2.3 Proprioception

qsd

2.4 Application dans la thèse

qsd

CHAPITRE

3

FONCTIONNEMENT DE LA VISION

Première interface et premier organe de la chaîne, l'œil -à contrario de ce qui est généralement pensé- n'est pas la pièce maîtresse de la vision : il ne sert *qu'à* envoyer des signaux électriques au cerveau et pourrait être remplacé par une caméra par exemple, dans la mesure où celle-ci émet les bonnes informations à travers le nerf optique [Dobelle, 2000]. L'œil reste néanmoins un outil très puissant et versatile. Nous allons ici rappeler le fonctionnement de l'œil et de la vision, à travers les informations collectées et transmises par l'œil puis traitées par le cerveau. Le sujet est déjà tout à fait connu et largement documenté [Driscoll *et al.*, 1978; Fairchild, 2005; Gross *et al.*, 2008; Wandell, 1995] aussi nous donnerons plutôt des références sur les parties plus pointues.

3.1 Structure de l'œil

L'œil se divise en un certain nombre de parties dont les principales sont la cornée, l'iris, la pupille, le cristallin, la rétine et les deux chambres contenant les humeurs aqueuse et vitrée. Toute la structure de l'œil est résumée sur la Figure 3.1.

La cornée est la première interface entre l'extérieur et l'intérieur de l'œil.

Le cristallin est la lentille principale de l'œil et va s'occuper de la netteté du monde qui nous entoure via le processus d'accommodation. Le principe est simple : il faut placer le foyer image de l'œil sur la rétine (cf. Section suivante). Pour ce faire, l'œil accommode, c'est à dire qu'il va modifier sa géométrie dans le but de modifier ses propriétés optiques. Dans la pratique, les muscles ciliaires font déformer le cristallin (cf. Figure 3.1) en réduisant sa hauteur et donc en augmentant sa convexité ou inversement. Ce processus dure 1 seconde et n'est pas définitif : une fois l'œil accommodé, celui-ci oscille légèrement autour de la valeur d'accommodation, à une fréquence de 5 Hz. Ce mécanisme permet de récupérer des feedbacks en cas d'ajustements à opérer [Gross *et al.*, 2008].

Le mécanisme d'accommodation ne fonctionne plus à partir d'un certain seuil de luminosité. Ce seuil est évalué à $0.01Cd/m^2$. En l'absence d'accommodation, l'œil prend une position intermédiaire entre la position relâchée (accommodation à l'infini) et une position *presque-accommodée* [Gross *et al.*, 2008].

La pupille et l'iris sont intimement liées car la première est l'espace laissé par la seconde au centre de l'œil. L'iris est une composante contrôlable de l'œil. L'iris contrôle la quantité de lumière qui arrive dans l'œil et donc sur la rétine. Plus la pupille sera grande, plus la lumière pourra rentrer dans l'œil. Un œil humain peut supporter des luminosité (luminance) allant de 10^{-6} à $10^5Cd/m^2$. Le diamètre de la pupille est régit par la l'équation Eq. 3.1. De la même manière que l'accommodation, le diamètre de la pupille oscille autour de sa valeur moyenne à l'instant t . Ce phénomène est appelé *hippus* [Gross *et al.*, 2008].

$$\log_{10}(D_{iris}) = 0.8558 - 0.000401 \cdot [8.4 + \log_{10}(L)]^3 \quad (3.1)$$

De la même manière, la vergence est la capacité des yeux de s'orienter vers le point d'accommodation lorsque celui est proche. On appelle convergence le phénomène qui consiste à augmenter l'angle formé par l'intersection des lignes du regard de chaque œil (quand la cible se rapproche) et divergence le cas inverse, lorsque cet angle diminue (la cible s'éloigne). Le processus possède une latence estimée à 150 ms et une durée approximative évaluée à 0.2 - 0.6 secondes [Devisme, 2004; Gross *et al.*, 2008].

L'œil humain a une taille globalement constante entre les individus : autour de 24 mm de diamètre [Glassner, 1995]. Le pouvoir optique de l'œil, c'est à dire sa capacité à adapter ses propriétés optiques, se mesure en dioptries. Les dioptries (δ) sont l'inverse de la distance focale d'un système optique, elles sont homogènes à des m^{-1} . Faire varier ses dioptries (et donc sa distance focale) permet l'accommodation et l'adaptation de l'œil. L'œil humain possède environ 42δ en fonctionnement et peut monter jusqu'à une puissance de 60 à 80δ pour compenser les défauts de l'œil [Glassner, 1995].

La rétine tapisse le fond de l'œil et est composée de millions de récepteurs photosensibles qui vont être responsable de la captation de l'image. Ces photo-récepteurs sont les cônes, sensibles à la couleur, et les bâtonnets sensibles à la luminosité. Il existe 3 types de cônes, qui sont chacun sensibles à différentes longueurs d'onde : on retrouve les cônes de type S (pour *small*, petite longueur d'onde) avec un maximum de sensibilité à 420 nm ; ensuite, on trouve les cônes de type M (pour *medium*, moyenne longueur d'onde) avec un maximum de sensibilité à 530 nm ; et en fin, on a les cônes de type L (pour *long*, grande longueur d'onde) avec un maximum de sensibilité à 560 nm. Le seul message émanant d'un cône ou d'un bâtonnet est celui de son activation. La reconnaissance des couleurs et de l'intensité de la lumière se fait par la combinaison des résultats d'activation des différents types de cône ; ce procédé est analogue à celui du tramage ¹ en informatique. L'œil humain ne possède que trois type de cône, alors qu'on pourrait penser qu'il y aurait un cône dédié à chaque couleur, et cela résulte d'une optimisation du nombre de cônes c'est à dire de la capacité de l'œil à extrapoler la couleur à partir du minimum de données, et la densité de ces capteurs. En effet, si l'œil possédait de nombreux autres types de cônes, la densité par cône serait grandement réduite et donc la finesse de vision aussi [Glassner, 1995].

1. Tramage : Procédé permettant de générer de nouvelles couleurs à partir d'une base limitée de couleurs. Typiquement, en informatique, les pixels des écrans sont en fait composés de 3 sous pixels : blanc, rouge et vert. Une fois combinés et vu d'assez loin, ils semblent ne créer qu'une seule couleur différente.

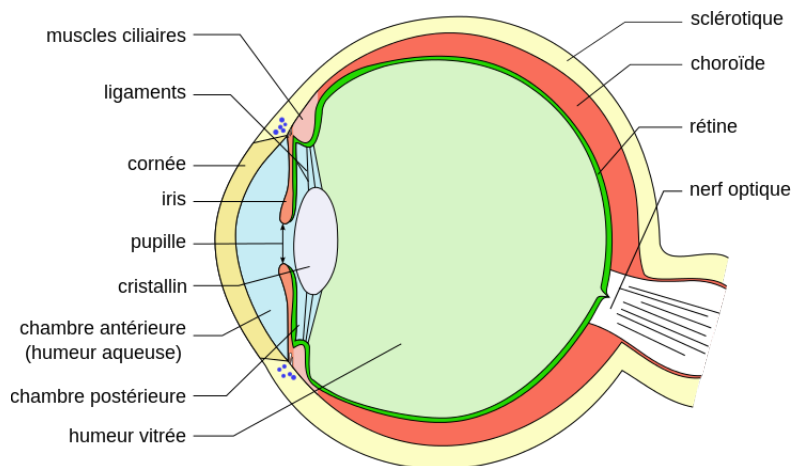


FIGURE 3.1 – Structure de l'œil

Les cônes et les bâtonnets ont chacun leur plage de fonctionnement optimale. Dans le domaine photopique (lumière du jour), les cônes sont saturés en luminosité et sont beaucoup moins efficaces que dans le domaine scotopique (de nuit). De leur côté, les cônes adaptent leur maximum de saturation par rapport au niveau global d'illumination [Glassner, 1995].

Enfin, la répartition des cônes et des bâtonnets sur la rétine n'est pas du tout homogène (cf. Fig. 3.2). Une zone de la rétine présente une extrême concentration de cônes. Cette zone est appelée *fovéa*. De par l'utilité des cônes et par construction du système optique de l'œil, c'est l'endroit où les rayons lumineux issus de la cible regardée convergent. En périphérie de la fovéa on retrouve les bâtonnets. Ce qui est vu dans la fovéa est net, tandis que ce qui est vu par les bâtonnets ne l'est pas. L'axe de vision est d'ailleurs défini par le rayon issu du point nodal image jusqu'à la fovéa (cf. section suivante). Cet axe, représenté sur la Figure 3.5 est donc fixe et l'angle qu'il forme avec l'axe optique de l'œil (ici appelé α) vaut entre 3 et 8 degrés suivant les individus [Gross *et al.*, 2008].

La rétine n'est que la première étape du système d'acquisition et la totalité de celui-ci ainsi que le traitement par le cerveau sera traité plus loin dans le chapitre.

3.2 Modélisation de l'œil

De nombreux scientifiques se sont intéressés à la compréhension et la modélisation de l'œil, et ce, dès la moitié du XIX^e siècle avec Carl Friedrich Gauss qui en a défini les grands principes optiques. Cependant, avant de discuter des différents modèles de l'œil qui ont pu émerger au cours (notamment) du XX^e siècle, il paraît nécessaire de reposer certaines bases élémentaires de l'optique géométrique.

On note quelques points particuliers dans un système optique simple (type lentille concave ou convexe). De manière générale, on rappelle que les points caractéristiques d'une lentille sont qualifiés de *objet* quand ils sont avant la lentille (en terme de trajet du rayon lumineux) et de *image* lorsqu'ils sont après la lentille. Par convention, un point caractéristique est noté avec une lettre majuscule tandis que son point conjugué image est noté avec la

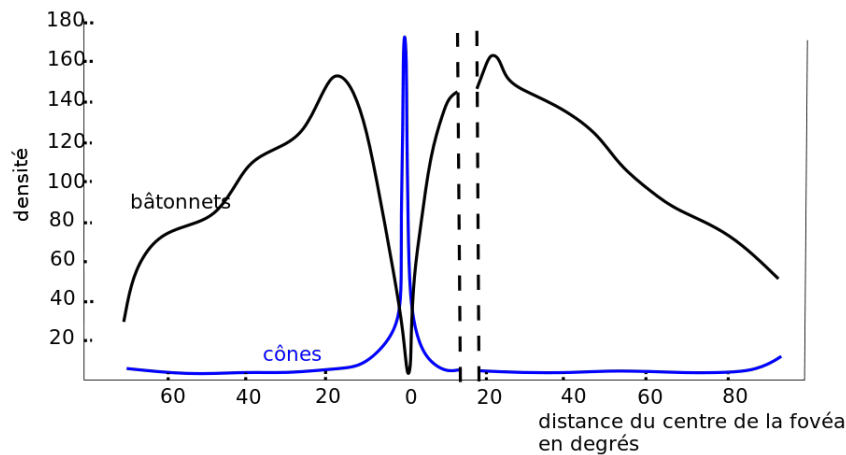


FIGURE 3.2 – Répartition (en *milliers/mm²*) des cônes/bâtonnets sur la rétine

même lettre agrémentée d'un *prime*.

- Le foyer objet est le point à partir duquel les rayons issus sont ensuite dirigés vers l'infini après passage par la lentille. Le foyer objet est noté F.
- Le foyer image est le point vers lequel convergent tous les rayons issus de l'infini avant la lentille. Dans le cas d'un œil sain (sans problèmes ophtalmologiques de type myopie ou hypermétropie), ce point doit être confondu avec la rétine pour avoir une image nette. Comme on a pu voir précédemment, c'est là le principal mécanisme de l'accommodation qui va déformer le système optique pour déplacer les foyers afin de faire la netteté sur la rétine. Le foyer image est noté F'.
- Le point central, par lequel un rayon passe sans être dévié, qui correspond au centre de rotation de l'œil. Il est noté C.
- Le point nodal objet est un point très particulier parce qu'il peut être considéré comme l'équivalent du *point de vision*, c'est à dire le point où on pourrait ramener l'intégralité de l'œil à un équivalent ponctuel. Dans un système optique, il est défini comme le point par lequel passe un rayon lumineux avec une incidence donnée et ressort au point conjugué avec la même incidence. Il n'existe que dans un système optique complexe (fait de plusieurs lentilles ou interfaces optiques), dans le cas d'une lentille simple seule il est confondu avec le centre. Ce point est globalement situé 6 mm à l'avant du centre de l'œil, sur l'axe optique [Gross *et al.*, 2008; Ogle, 1968]. Les points nodaux sont notés N et N'.

L'œil possède deux axes principaux : l'axe optique, qui passe par les centres de toutes les surfaces optiques ou composantes de l'œil (cristallin, pupille, ...) et l'axe de vision qui est composé en fait de deux demi-axes que sont les rayons qui passent par les points nodaux et jusqu'à la fovéa. L'œil est orienté selon l'axe optique mais la vision se fait le long de l'axe optique. La vision hors axe optique est appelée *vision périphérique*.

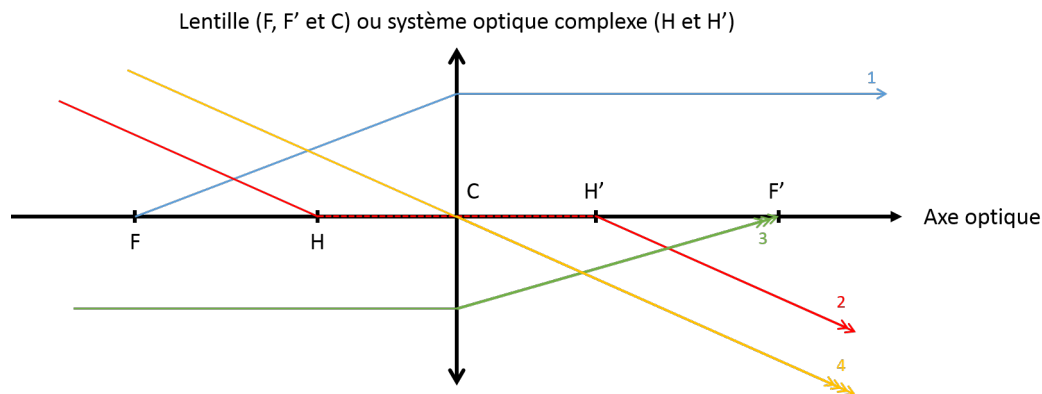


FIGURE 3.3 – Points caractéristiques (cardinaux) d'un système optique plan

Enfin, un grand nombre de modèles de l'œil ont été proposés, plus ou moins complexes, avec notamment des variations sur le nombre de surfaces optiques, jusqu'à l'adoption du modèle de [Liou & Brennan, 1997]. Malgré tout ce modèle est tout sauf définitif et est toujours susceptible d'être amélioré ou affiné dans le futur. Voici une liste pas tout à fait exhaustive des différents modèles de l'œil qui ont pu être élaborés au cours du XX^{ème} siècle [Gross *et al.*, 2008; Liou & Brennan, 1997] :

- Modèle de Helmholtz - Laurence (1909)
- Modèle de Gullstrand (1911) : modèle le plus utilisé, notamment car un grand nombre de distances (taille de l'œil, distances focales, distance de la pupille, ...) et tous les indices de réfractifs des différents milieux de l'œil y sont reportés (cf. Figure 3.4). Le modèle optique théorique pour la propagation de la lumière est composé de 3 surfaces.
- Modèle de Emsley (1946) : modèle simplifié réduit à 1 seule surface.
- Modèle de Lotmar (1971) : modélisation de la cornée et de la face arrière du cristallin par des surfaces polynomiales (plutôt que des sections de sphère).
- Modèle de Kooijman (1983) : modèle en 4 surfaces, ajout d'asphéricités sur les surfaces sphériques.
- Modèle de Navarro (1985) : idem que Kooijman avec des effets chromatiques type dispersion de la lumière en plus.
- Modèle de Schwiegerling (1995)
- Modèle de Liou & Brennan (1997) : modèle à 5 surfaces dont 1 purement théorique (cf. Figure 3.5). C'est le modèle le plus utilisé dans le domaine du calcul et de la simulation de rayons.

Jusqu'à présent, nous avons détaillé le fonctionnement d'un œil seul, nous allons maintenant nous intéresser à la vision binoculaire, c'est à dire de deux yeux en même temps.

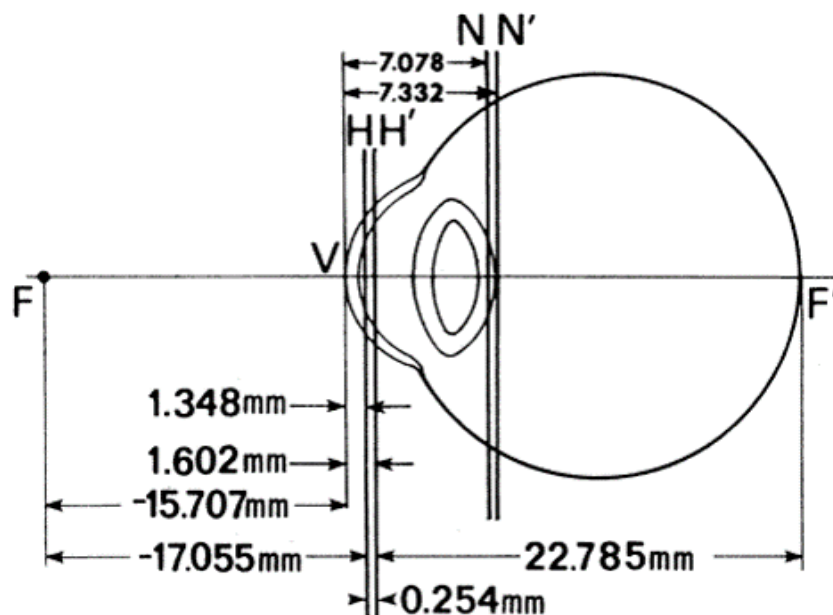


FIGURE 3.4 – Modèle et valeurs physiologiques de Gullstrand, image tirée de [Liou & Brennan, 1997]

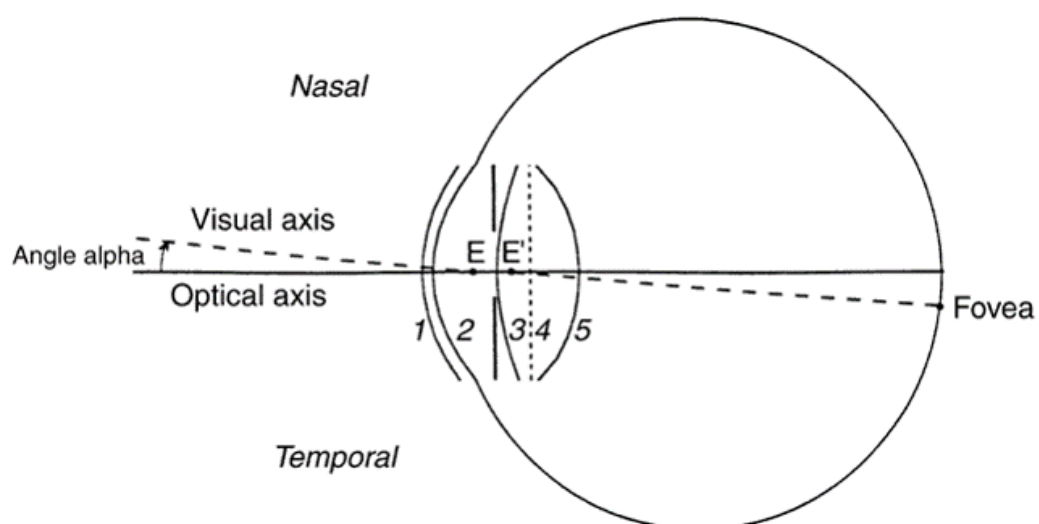


FIGURE 3.5 – Modèle de Liou & Brennan, image tirée de [Liou & Brennan, 1997]

3.3 Vision binoculaire

La vision binoculaire est avant tout un excellent outils de compréhension de l'environnement qui nous entoure, et notamment de la profondeur : le cerveau peut comparer en temps réel deux points de vue légèrement différents et en tirer des conclusions.

L'élément de fonctionnement de la vision binoculaire est les disparités, c'est à dire la différence de position relative entre les deux images perçues (une par œil) d'un même objet. Si un objet est pleinement centré sur l'image perçue par l'œil gauche, il sera vu légèrement décalé du centre par l'œil droit. Il existe deux types de disparités ; les disparités verticales et les disparités horizontales [Devisme, 2004].

Les disparités horizontales sont générées par une différence angulaire sur le plan de l'azimut. Elles sont en charge de la perception relative de la distance, c'est à dire à la perception de la profondeur (relief).

Les disparités verticales sont issues de la perception par les yeux d'une différence d'élévation pour le même point. Elles peuvent aussi apparaître si un des yeux est plus proche de l'objet que l'autre (on parle alors de grossissement différentiel). Les disparités verticales permettent d'estimer la distance absolue d'un objet ainsi que l'excentricité d'une surface, indépendamment de son orientation.

Les disparités peuvent être source de fatigues dans le système visuel humain. Ce problème a été adressé notamment en ajoutant du flou sur les disparités les plus grandes, en ajoutant un flou périphérique pour reproduire le flou rétinien et en proposant un modèle de caméras convergentes qui génère des disparités plus conformes à la réalité [Aurat, 2016].

L'horoptère est le lieu des points de disparité horizontale nulle pour un point de fixation donné, c'est à dire, à un instant t donné, lorsqu'on regarde à un endroit donné, il existe une infinité de points pour lesquels aucun disparité n'est perçue : ils sont au même endroit sur l'image perçue par l'œil gauche et par celle perçue par l'œil droit. Théoriquement, le lieu de ces points est un cercle passant par le point de fixation et par le premier point nodal (point nodal objet, H) de chaque œil ; ce cercle s'appelle le Cercle de Vieth-Müller. Dans la pratique, le lieu de l'horoptère n'est pas tout à fait un cercle et présente une légère déviation, nommée Déviation de Hering-Hillebrand (cf. Fig. 3.6) [Neveu, 2012].

Si on prend en compte les disparités verticales, le lieu des points de disparité horizontale-verticale nulle devient un cylindre (Extension du Cercle de Vieth-Müller).

L'œil possède une certaine capacité à adapter sa puissance (comme vu précédemment). On retrouve cette capacité au niveau du cerveau pour la fusion stéréoscopique. Dans une zone proche autour de l'horoptère (Aire de Panum) le cerveau écrase les disparités et fusionne quand même les images perçues par les yeux. L'étendue et la forme de l'aire de Panum est grandement dépendante des caractéristiques locales du stimulus [Devisme, 2004].

Enfin, la vision binoculaire est tributaire d'une certaine acuité stéréoscopique, c'est à dire la capacité à percevoir un écart de profondeur entre deux plans à une distance donnée. Celle ci est présentée et son modèle démontré à plusieurs endroits [Fuchs *et al.*, 2003; Gross *et al.*, 2008] et sera abordée dans un chapitre suivant. Toutefois, si l'âge et le niveau

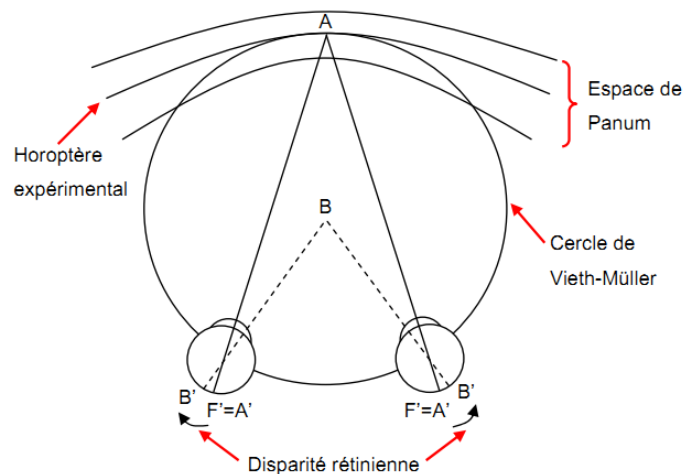


FIGURE 3.6 – Horoptères théorique et empirique, Aire de Panum et disparités rétinienne. Image tirée de [Neveu, 2012].

d'accommodation n'ont pas l'air d'affecter l'acuité stéréoscopique, cette dernière semble dépendante du contraste et de la quantité d'éclairement rétinien [Devisme, 2004].

3.4 Traitement post-rétinien

Nous allons maintenant aborder toute la partie transmission et traitement par le cerveau du signal émis par les rétines. Le comportement précis dans le cerveau est encore à ce jour une question ouverte que nous traiterons donc dans les limites du possible et de l'utile dans le cadre de cette thèse. On ne peut ici que conseiller l'excellent *Neurosciences : A la découverte du Cerveau* de [Bear et al., 2007].

Tout d'abord, il convient de développer quant à la structure même des cônes, de quelle manière ceux-ci jouent leur rôle de transducteur¹ : transformant un signal lumineux entrant en signal électrique sortant.

La rétine est en fait composée de plusieurs types de cellules intermédiaires, les cônes et les bâtonnets n'étant qu'en bout de chaîne : cellules ganglionnaires, cellules amacrines, cellules horizontales et cellules bipolaires (cf. Fig. 3.7) [Bear et al., 2007]. Ces cellules se réunissent ensuite pour former le nerf optique et sortir de l'œil. Parmi les cellules ganglionnaires il en existe plusieurs types, chaque type véhiculant des informations différentes [ANSES, 2014].

La voie magnocellulaire (M) représente 5% de la population de cellules ganglionnaires. Ces cellules sont sensibles aux contrastes de luminance et ont une vitesse de conduction plutôt rapide. Elles sont à relier à la voie dorsale (cf. ci-après).

La voie parvocellulaire (P) représente 90% de la population de cellules ganglionnaires. Ces

1. Transducteur : Dispositif assurant une conversion ou un transfert de signaux et dans lequel un signal au moins est de nature électrique. (s.d.). Dans *Dictionnaire Larousse en ligne*. Repéré à <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/transducteur/79088>

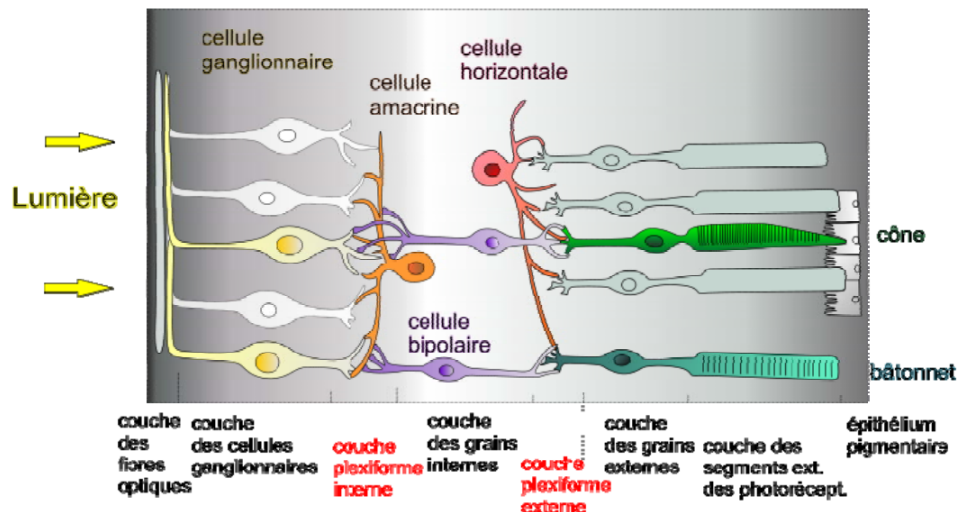


FIGURE 3.7 – Structure et cellules composant la rétine, image tirée de [ANSES, 2014].

cellules sont sensibles aux couleurs et, malgré une vitesse de conduction plus lente que les cellules de la voie M, elles répondent de manière tonique aux stimulations. Ces cellules sont à rapprocher de la voie ventrale.

Enfin, il existe une voie M-non P qui représente les 5% de population restants et participent à d'autres tâches que la vision pure (cf. ci-après).

Une fois le signal lumineux transformé dans une des trois voies (M, P ou M-non P), l'information circule dans le nerf optique en direction du cerveau. Les nerfs optiques de chaque œil se croisent au niveau du chiasma optique avant de continuer leur chemin dans le tractus optique et d'arriver au cerveau. Au niveau du chiasma, les fibres porteuses des informations visuelles sont redirigées : les fibres des deux moitiés gauches des yeux sont envoyées à la partie droite du cerveau, tandis que les fibres des deux moitiés droites des yeux sont envoyées à la partie gauche.

L'interface entre le cerveau à proprement parler et le tractus optique s'appelle le CGL (Corps Genouillé Latéral). Le CGL est composé de 6 couches qui vont permettre la distribution de l'information dans les différents cortex visuels. Les informations issues de la voie M sont attribuées aux couches 1 et 2 du CGL, tandis que les informations de la voie P sont attribuées aux couches 3, 4, 5 et 6 du CGL. Les 5% d'informations restantes (la voie M non P) ne va pas dans le CGL (et donc dans les cortex d'analyse de l'image) mais se dirige dans la mésencéphale et l'hypothalamus. Ces deux dernières aires du cerveau sont dédiées à la gestion du reste du corps humain : régulation du bio-rythme, sécrétion des hormones du sommeil, gestion de l'attention, ...

La radiation optique permet de faire le lien, via des neurones, entre les 6 couches du CGL et le Cortex Visuel Primaire (V1) qui marque l'entrée dans le cerveau à proprement parler.

Le traitement et la compréhension véritable des informations qui ont transité de l'œil jusqu'au CGL se fait dans les cortex visuels. La cartographie et la compréhension du fonctionnement en cortex dans le cerveau fait l'objet de plusieurs théories. Aux côtés des modèles

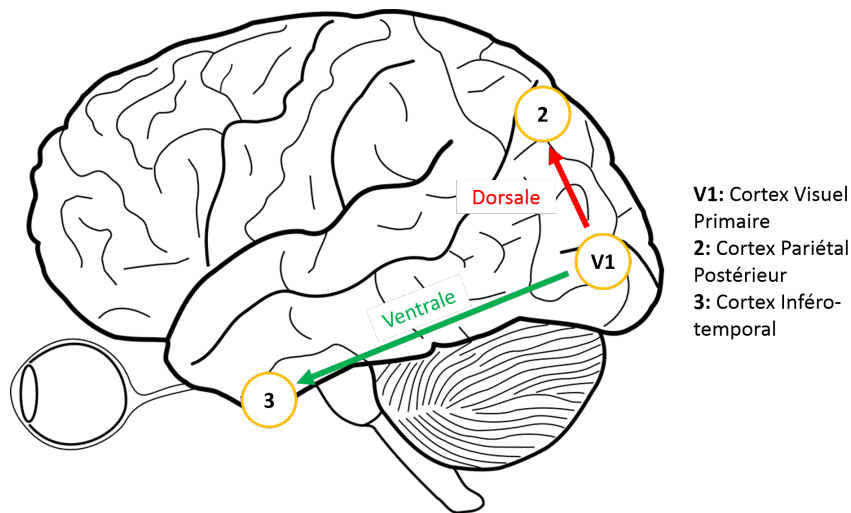


FIGURE 3.8 – Direction des voies ventrale et dorsale dans le cerveau.

hiérarchique et des agrégats, c'est l'hypothèse des deux voies [Goodale *et al.*, 1991; Mishkin *et al.*, 1983; Ungerleider & Mishkin, 1982] qui prédomine. Cette hypothèse est aussi étendue au fonctionnement de l'audition.

Le traitement de l'image dans les cortex visuels est décomposé en deux voies, à l'image des voies P et M. A l'arrivée dans le Cortex Visuel Primaire (V1), l'information est divisée en deux boucles de traitement indépendantes : la voie dorsale (appelée aussi pariétale) et la voie ventrale (appelée aussi temporale). La voie dorsale correspond au traitement du mouvement et de la position (« Where »), elle est constituée des cortex V1, V2, V3, V3A, MT et MST avant d'arriver dans le Cortex Pariétal Supérieur. Cette fois fonctionnement à une vitesse plutôt lente. De l'autre côté, la voie ventrale s'occupe de la gestion des forme et des couleurs (« What ») et passe par les cortex V1, V2, VP, V4 et V8 avant d'arriver dans le lobe temporal. Cette voie fonctionne à grande vitesse [D'hondt, 2011; James & Kim, 2010].

L'information visuelle n'est pas transmise au cerveau telle qu'elle sous la forme de quatre informations (bâtonnets, cônes S, cônes M, cônes L). Ces signaux de sortie des photo-récepteurs sont additionnés ou soustraits les uns entre les autres pour donner naissance à trois canaux d'information qui eux seront traités par le cerveau. Cette hypothèse de fonctionnement -la *Théorie des processus antagoniques* proposée pour la première fois par Ewald Hering en 1872- est compatible avec la théorie de la vision trichromatique (*Théorie de Young-Helmholtz*, 1802 puis prouvée en 1861) puisqu'elle intervient immédiatement après dans le traitement de la lumière.

Après les photo-récepteurs, le signal lumineux est donc découpé en trois canaux [Glassner, 1995; Winkler, 1999] un canal achromatique (A) et deux canaux chromatiques (R/G pour le canal rouge-vert et B/Y pour le canal bleu-jaune). On retrouvera ces canaux plus tard dans la description des espaces colorimétriques en informatique. Le canal achromatique sert à coder la valeur de luminance et est issu de la somme des signaux émis par les cônes de type M et L, $A \equiv M + L$. Le canal R/G est quand à lui la différence entre les deux précédents canaux M et L ($R/G \equiv M - L$) tandis que le canal B/Y est la différence entre les signaux émis par les cônes de type S et le canal achromatique : $B/Y \equiv S - A$. Ces mécanismes sont résumés dans la Fig. 3.9.

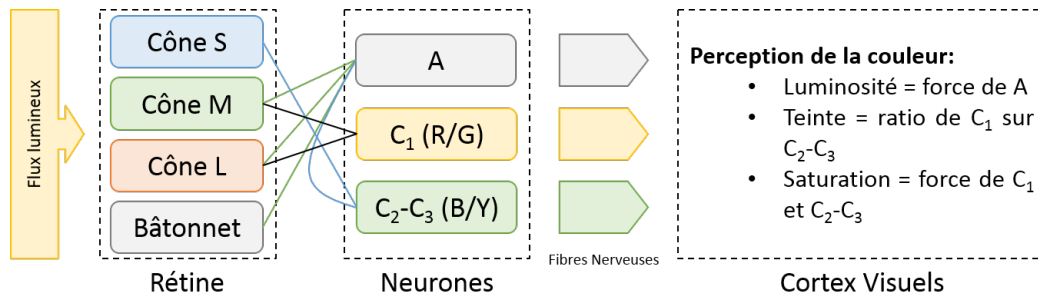


FIGURE 3.9 – Construction des canaux chromatiques et achromatique dans la théorie des processus antagoniques

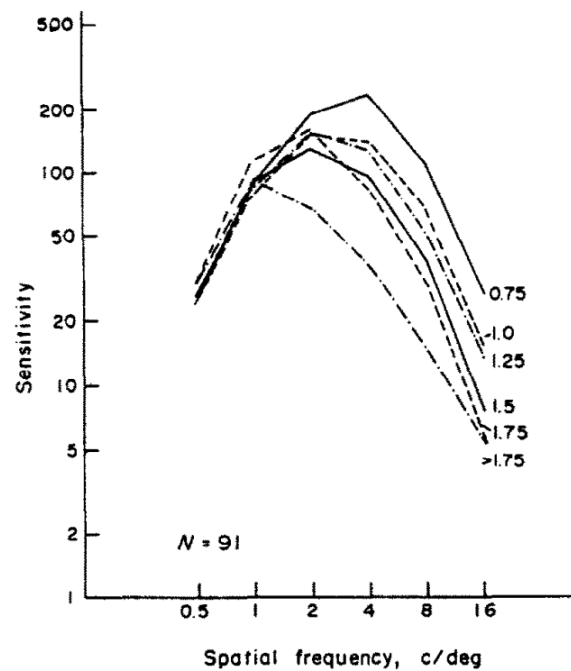


FIGURE 3.10 – Courbes moyennes de sensibilité au contraste en fonction de la fréquence spatiale du stimulus pour différentes valeurs d'acuité visuelle, tiré de [Owsley *et al.*, 1983]

Enfin, le cerveau dénote une certaine sensibilité au contraste (entendu ici comme une variation relative de luminance entre deux points de l'image perçue). Cette sensibilité dépend à la fois de la couleur (on a vu que le canal achromatique était en fait composé des retours de deux types de cônes) et à la fois des fréquences spatiales et temporelles du stimulus lumineux reçu. On peut alors établir des fonctions de sensibilité au contraste (Contrast Sensibility Functions - CSF) [Bezzubik & Belashenkov, 2015; Driscoll *et al.*, 1978]. La sensibilité au contraste est définie comme l'inverse du seuil de contraste, c'est à dire le minimum nécessaire de contraste suffisant à un observateur pour détecter une variation. Les variables *temps* et *espace* des CSF ne sont pas séparables. On peut trouver des exemples de CSF chez une grand nombre d'auteurs, comme ici avec les CSF moyennes en fonction de la fréquence spatiale du stimulus, pour différentes valeurs d'acuité visuelle (cf. Fig. 3.10) [Owsley *et al.*, 1983].

CHAPITRE

4

PERCEPTION DE LA COULEUR

La perception de la couleur a été théorisée via un certain nombre de concepts, lois ou effets ; on présente ici les principales contributions [Judd & Wyszecki, 1975; Le Grand, 1972; Wyszecki & Stiles, 2000].

4.1 Espaces colorimétriques

Il existe de très nombreux espaces colorimétriques (sRGB, YIQ, YES, YCC, LCh, TekHVC, NCS, Munsell, Coloroid, Pantone, CIECAM97, ... [Beretta, 2000]) mais une étude globale poussée sort très largement du cadre de l'étude. Nous nous concentrerons donc à évoquer rapidement les différents espaces principaux adoubés par la CIE.

La première tentative à avoir été déposée par la CIE, en 1931, est l'espace colorimétrique CIE RGB. C'est une première tentative de quantification de la couleur avec des primaires proches des maxima de réponse des cônes. La démarche est donc anthropomorphique et cherche à construire un espace linéaire. L'inconvénient (majeur) de ce système est l'obligation de passer par des composantes négatives pour certaines couleurs très saturées ; on s'éloigne alors du fonctionnement de la vision humaine qui est basée sur l'additivité des couleurs.

Les défauts de ce premier espace ont amené la CIE à proposer dans le même temps un autre espace, le CIE XYZ, lui aussi linéaire ². Dans ce modèle, Y donne la luminance tandis que X et Z donnent la chrominance et sont définis positifs par construction.

Mais la vision humaine des couleurs n'étant pas linéaire, un nouvel espace est adoubé

2. Linéaire : les valeurs des primaires varient linéairement, pas les couleurs perçues : une variation de primaire ne donne pas la même variation de couleur

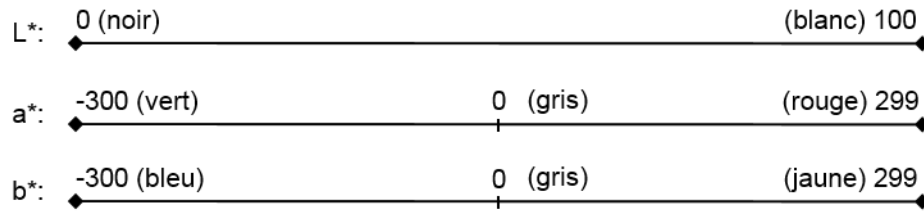


FIGURE 4.1 – Composantes de l'espace CIELAB

par la CIE, en 1960, c'est le CIE UVW. Cet espace est non-linéaire et vise à améliorer l'uniformité de répartition des couleurs ¹. Dans ce modèle, la composante V correspond en tout point à la composante Y de CIE XYZ (luminance). UVW est supplanté 16 ans plus tard (1976) par CIE U'V'W' dont la variation principale est le changement de la matrice de passage vers XYZ.

Enfin, en 1976 également, apparaissent les deux espaces les plus complets et utilisés à l'heure d'aujourd'hui : CIELAB et CIELUV. CIELUV est utilisé pour caractériser les couleurs de lumières tandis que CIELAB sert dans le domaine des couleurs de surface. Ils sont basés sur U'V'W' et appartiennent à la famille des espaces uniformes mais non-linéaire. Nous détaillerons ici CIELAB car c'est celui qui est utilisé dans le domaine de l'informatique. Pour de plus amples informations, on conseillera [Schanda & International Commission on Illumination, 2007] au lecteur.

L'espace CIELAB, de sa vraie dénomination CIE $L^*a^*b^*$, est caractérisé par une composante de clarté L^* et deux paramètres a^* et b^* qui expriment l'écart de la couleur par rapport à une surface grise de même clarté. a^* et b^* prennent leurs valeurs entre -300 et +299, 0 étant le gris de référence, mais sont en fait en général restreints entre -128 et +127 de manière à avoir 256 valeurs et être codé sur 8 bits. Le passage en couleurs codées sur 10 bits permet une nuance d'autant plus importante.

La composante a^* varie du vert (-300) vers le rouge (+299) tandis que la composante b^* varie du bleu (-300) au jaune (+299) (cf. Fig. 4.1); ce schéma est analogue au fonctionnement des canaux R-G et B-Y pour le traitement de l'image dans le cerveau.

Le gris achromatique de référence est calculé en fonction de la lumière d'éclairage, l'illuminant choisi est en général D65, par emprunt à l'esthétique du cinéma.

La conversion de CIE XYZ vers CIELAB se fait avec les équations suivantes [Robertson, 1990] :

$$f(x) = \begin{cases} x^{1/3}, & x > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3} \left(\frac{6}{29}\right)^2 x + \frac{4}{29}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.1)$$

Avec X, Y, Z les composantes CIE XYZ de la couleur, X_N, Y_N, Z_N les composantes CIE XYZ

1. Uniforme : les couleurs perçues varient de manière linéaire, au contraire de la valeur des primaires dans l'espace colorimétrique

du point blanc de référence, et :

$$\begin{cases} L^* = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_N}\right) - 16 \\ a^* = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_N}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_N}\right) \right] \\ b^* = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_N}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_N}\right) \right] \end{cases} \quad (4.2)$$

Les valeurs Des coefficients des équations de L, a et b sont en fait des valeurs approchées. Les valeurs exactes sont :

$$L^* : 117,16 \text{ et } 17.16$$

$$b^* : 509.39$$

$$b^* : 203,75$$

CIELAB a aussi été traduit en coordonnées cylindriques : LCh. Les composantes C et h sont les coordonnées polaires de a^* et b^* . Ces espaces permettent de qualifier n'importe quelle couleur indépendamment de la luminosité.

4.2 Lois et effets

Lois de Grassman

Hermann Grassmann (1809 - 1877) énonce trois lois fondamentales du comportement des couleurs en 1953. Ces lois linéaires ne sont toutefois pas universelles et présentent encore des défauts dans la zone des courtes longueurs d'onde tandis que la primaire bleue est jugée trop inhibitrice [Le Grand, 1972].

La première loi stipule que toute sensation colorée (couleur) peut être reproduite par le mélange de trois primaires fixées (Eq. 4.3).

$$\{C\} \equiv R \cdot \{R\} + V \cdot \{V\} + B \cdot \{B\} \equiv \begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

La seconde loi stipule que toute couleur produite par la somme de deux couleurs est égale à la somme de ces deux couleurs (Eq. 4.4).

$$\{C\} \equiv \{C_1\} + \{C_2\} \equiv \begin{pmatrix} R_1 + R_2 \\ V_1 + V_2 \\ B_1 + B_2 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Enfin, la troisième loi de Grassmann indique que si on augmente ou diminue une couleur dans une certaine proportion, cela revient à modifier chaque composante de la couleur par

cette même proportion (Eq. 4.5).

$$\{C'\} \equiv k \cdot \{C\} \equiv \begin{pmatrix} k \cdot R \\ k \cdot V \\ k \cdot B \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Loi d'Abney

Si quatre couleurs A, B et X, Y ont la même luminosité perçue deux à deux alors les mélanges additif de A et X et de B et Y auront la même luminosité perçue.

Cette loi n'est valable que dans certaines conditions très précises : en vision scotopique (vision de nuit) [Le Grand, 1972], lors de comparaison de couleurs par papillotement (alternance courte et rapide de couleurs) [Sève, 2009] ou en vision photopique (vision de jour) pour des angles de vision très restreints et des lumières très peu saturées.

Effet Purkinje

Le spectre d'efficacité de vision des couleurs dépend de la luminosité, il se décale en fonction de la valeur de la luminosité : lorsqu'elle est forte, l'œil humain distingue mieux les couleurs rouges tandis que lorsqu'elle est faible, les couleurs bleues sont mieux perçues [Le Grand, 1972].

Effet Helmholtz-Kohlrausch

La luminance perçue des couleurs varie, à luminance constante, en fonction de la teinte et de la saturation. Plus une couleur est saturée/teintée, plus elle est lumineuse [Le Grand, 1972].

Il en découle que le calcul de la luminosité ne devrait pas se faire sur la base seule de la composante Luminance.

Effet Stiles-Crawford

On note une perte de luminosité en bordure de champ visuel, ce qui induit des couleurs altérées en périphérie [Damelincourt *et al.*, 2010].

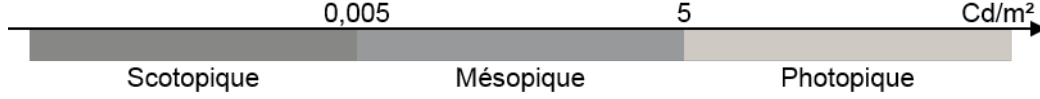


FIGURE 4.2 – Répartition des domaines photopique, mésopique et scotopique

Loi de Rico

Pour les petits angles de vision (inférieurs à 1,72 degrés - 30 millirad), l'acuité visuelle dépendrait du contraste [Damelincoourt *et al.*, 2010] :

$$\begin{cases} C_s \cdot \alpha^2 = cste, & \alpha \leq 0.17^\circ \\ C_s \cdot \alpha = cste, & 0.17^\circ < \alpha \leq 1.72^\circ \end{cases}$$

4.3 Observateurs standards

Tout d'abord, il convient de (re)définir les trois domaines de vision qui correspondent à des quantités d'illumination différentes (cf. Fig. 4.3) 4.2) [Damelincoourt *et al.*, 2010] :

- La vision *photopique* décrit la vision diurne (ou à haute luminosité). On entre dans le domaine *photopique* à partir d'une illumination de 5 Cd/m^2 .
- La vision *scotopique* décrit la vision nocturne (ou à très basse luminosité). On entre dans le domaine *scotopique* en dessous d'une illumination de 0.005 Cd/m^2 .
- La vision *mésopique* décrit la vision intermédiaire entre diurne et nocturne (luminosité basse). Le domaine *mésopique* se situe pour une illumination entre 0.005 Cd/m^2 et 5 Cd/m^2 .

La CIE a défini le concept d'*Observateur Standard* comme un profil d'efficacité lumineuse en fonction de la longueur d'onde (cf. Fig. 4.3). Chaque domaine de luminosité possède son *Observateur Standard*.

$$\text{Soit : } \begin{cases} \Phi_e(\lambda) & \text{le flux énergétique en W (watts)} \\ \Phi_v(\lambda) & \text{le flux visuel en lm (lumen)} \\ \lambda & \text{la longueur d'onde en nm (nanomètres)} \end{cases}$$

En 1931, un premier *Observateur Standard Photopique* pour le domaine photopique est mis au point. Il est noté $V(\lambda)$ et est valable pour un cône de vision de 2° , c'est à dire globalement la zone d'acuité de la fovéa. Cet observateur est révisé en 1964, en prenant en compte les résultats expérimentaux de plus de sujets pour calculer les coefficients. L'observateur est noté $V_{10}(\lambda)$ et couvre cette fois un cône de vision de 10° [Damelincoourt *et al.*, 2010; Le Grand, 1972] :

$$\begin{cases} \Phi_v(\lambda) = K_M \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \\ K_M = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \end{cases} \quad (4.6)$$

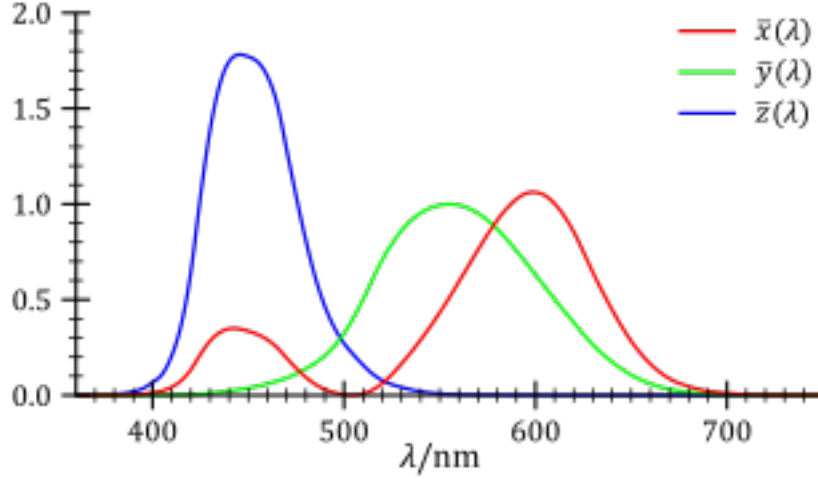


FIGURE 4.3 – Courbes d'efficacité lumineuse des Observateurs Standards de la CIE

L'*Observateur Standard Scotopique* est quant à lui défini en 1951. Il est noté $V'(\lambda)$:

$$\begin{cases} \Phi_v(\lambda) = K'_M \cdot V'(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \\ K'_M = 1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \end{cases} \quad (4.7)$$

Enfin, il faut attendre 2010 pour voir apparaître l'*Observateur Standard Mésopique*, $V_{mes}(\lambda)$, qui n'est rien d'autre qu'une somme pondérée des deux autres observateurs en fonction de la luminance [Halonen & Puolakka, 2011] :

$$\begin{cases} \Phi_v(\lambda) = K_{mes} \cdot V_{mes}(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \\ V_{mes}(\lambda) = (1 - m) \cdot V'(\lambda) + m \cdot V(\lambda) K_{mes} = \frac{683}{V_{mes}[555]} \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \end{cases} \quad (4.8)$$

Les valeurs de m sont fixées en dehors des bornes du domaine mésopique ($m = 1$ pour $L_{mes} \geq 5 \text{ Cd/m}^2$ et $m = 0$ pour $L_{mes} \leq 0.005 \text{ Cd/m}^2$), sinon elles sont calculées par récurrence [Halonen & Puolakka, 2011] :

$$\begin{cases} m_0 = 0.5 & a = 0.7670 \\ m_n = a + b \cdot \log_{10}(L_{mes,n}) & b = 0.3334 \\ L_{mes,n} = \frac{m_{n-1} \cdot L_{photopic} + (1 - m_{n-1}) \cdot L_{scotopic} \cdot V'(\lambda_0)}{m_{n-1} + (1 - m_{n-1}) \cdot V'(\lambda_0)} & \lambda_0 = 555 \text{ nm} \end{cases} \quad (4.9)$$

4.4 Illuminants

Les illuminants sont des standards de lumière déposés par la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) sous la forme de spectre de lumière visible (cf. Figure 4.4). Chaque illuminant représente un certain type et une certaine couleur de lumière. Si l'illuminant D65 est le plus connu et le plus utilisé car il correspond à une lumière de midi en Europe occidentale, il existe plusieurs catégories.

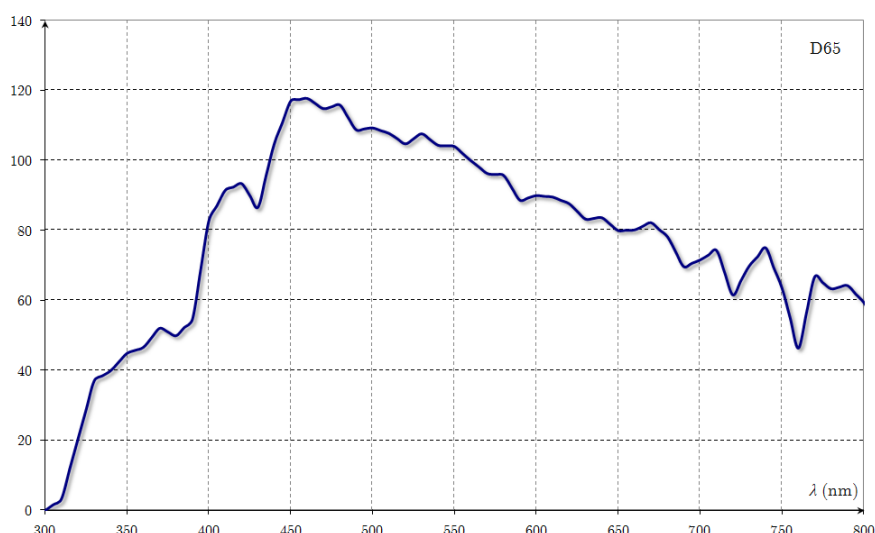


FIGURE 4.4 – Spectre de l'illuminant D65 (CIE)

- La classe A, déposée en 1931, représente une lumière moyenne d'une lampe à incandescence (filament en tungstène).
- La classe B (1931) représente la lumière directe émanant du soleil.
- La classe C (1931) représente la lumière du jour (après passage dans l'atmosphère).

Une deuxième vague d'illuminants ont été adoptés plusieurs années après, à l'occasion de l'adoption du second observateur standard :

- La classe D (1964), qui se subdivise en plusieurs illuminants qui représentent les différentes phases de la lumière du jour, D65 étant midi.
- La classe E associée aux illuminants d'énergie égale (iso-énergie).
- La classe F représentant différentes lampes fluorescentes.

4.5 Equations de différentiations des couleurs

Une fois l'espace colorimétrique choisi, on peut dénombrer le nombre de couleurs théoriques discernables. Par exemple, dans le cas de l'espace RGB codé sur 8 bits on a 256 valeurs possibles pour chaque primaire. Lorsque l'on combine les trois primaires, on obtient un nombre théorique de 16.8 millions de couleurs. Si chacune de ces couleurs est a priori discernable, elles ne le sont pas forcément deux à deux. La CIE a donc mis en place une métrique qui indiquerait si la différence entre deux couleurs était, ou non, perceptible : ΔE . Par construction, pour $\Delta E < 1$ la différence de sensation colorée n'est pas perceptible et l'œil humain ne voit aucune différence. Empiriquement la valeur de seuil est bien plus élevée et dépend même du type de population (experte ou néophyte dans la reconnaissance de couleurs) [Sharma & Bala, 2013; Vidal *et al.*, 2016].

Il existe plusieurs équations pour calculer l'écart colorimétrique ΔE , toutes ont été officialisées par la CIE en attendant des versions plus pertinentes [Beretta, 2000; Habekost, 2013; Robertson, 1990; Sharma *et al.*, 2005] :

- CIE76
- CIE94
- CIEDE2000
- CMC(l,c)

On exprimera ici les équations dans l'espace CIELAB dans sa version originale ($L^*a^*b^*$) ou dans sa version en coordonnées cylindriques (L^*Ch_{ab}).

La première équation, CIE76, est la plus simple et consiste en une simple distance euclidienne dans l'espace colorimétrique [Sharma & Bala, 2013] :

$$\Delta E_{76} = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (4.10)$$

Ensuite, CIE76 a été modifiée pour s'adapter à la non linéarité de perception des couleurs [Beretta, 2000], elle est adoptée en 1994 et devient CIE94 :

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H \cdot S_H}\right)^2} \quad (4.11)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \\ \Delta H_{ab}^* = \sqrt{\Delta E_{ab}^{*2} - \Delta L^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}} = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}} \\ S_C = 1 + 0.0045 \cdot C_{ab}^* \\ S_H = 1 + 0.0015 \cdot C_{ab}^* \\ S_L = k_L = k_C = k_H = 1 \end{cases}$$

L'équation de 1994 résout un grand nombre de problèmes mais éprouve toujours des difficultés à décrire parfaitement le comportement de l'oeil, notamment dans le bleu. Une troisième équation est donc officialisée en 2000, CIEDE2000 [Schanda & International Commission on Illumination, 2007; Sharma *et al.*, 2005] :

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H \cdot S_H}\right)^2 + R_T \cdot \frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C} \cdot \frac{\Delta H'}{k_H \cdot S_H}} \quad (4.12)$$

Le détail des coefficients de ΔE_{00}^* (parce que extrêmement complexes et hors de propos ici) sont visibles sur l'excellent site de Bruce Lindbloom ¹.

1. Bruce Lindbloom, *Delta E (CIE 2000)*, http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CIE2000.html (Juillet 2016)

Enfin, si CIEDE2000 donne de très bon résultats lorsqu'il faut discriminer des couleurs de manière objective, c'est une autre équation, DECMC qui semble plus appropriée pour une discrimination subjective/perceptuelle [Habekost, 2013] :

$$\Delta E(l, c) = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{l \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{c \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2} \quad (4.13)$$

Avec : $\begin{cases} (l, c) = (2, 1) & \text{pour l'acceptabilité} \\ (l, c) = (1, 1) & \text{pour la perceptibilité} \end{cases}$

De même que pour CIEDE2000, le détail des coefficients de $\Delta E(l, c)$ sont disponibles sur le site de Bruce Lindbloom².

². Bruce Lindbloom, *Delta E (CMC)*, http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CMC.html (Juillet 2016)

CHAPITRE

5

PERCEPTION VISUELLE DE LA PROFONDEUR

La perception de la profondeur est une des composantes fondamentales de la vision et doit faire partie des critères d'une immersion réussie. Cette perception passe par un certain nombre de principes et de paradigmes à la fois monoculaires (fonctionnement grâce à un seul œil) ou binoculaire (fonctionnement nécessairement avec les deux yeux). Les indices de profondeurs utilisés par le cerveau sont les suivants, et sont résumés et ordonnés dans la Fig. 5.1 :

- Accommodation
- Vergence
- Disparités
- Parallaxe
- Indices statiques : interposition, taille, perspective linéaire, gradient de texture, perspective aérienne, ombre, ...

Premièrement, le cerveau peut récupérer assez facilement les informations d'*accommodation* et de *vergence* via le principe de proprioception évoqué plus haut. En récupérant des informations sur les muscles oculomoteurs le cerveau en déduit l'état de vergence et de l'accommodation puis des informations sur la proximité de l'objet sur lequel est concentré le regard. En effet, une accommodation et une vergence à l'infini signifieront un objet éloigné et inversement. Ces indices ne sont pas forcément les plus forts et les plus robustes mais ils participent à un tout.

Les *disparités* ont déjà été présentées précédemment, aussi on renverra le lecteur à la section correspondante pour une description plus détaillée. La différence de disparité entre

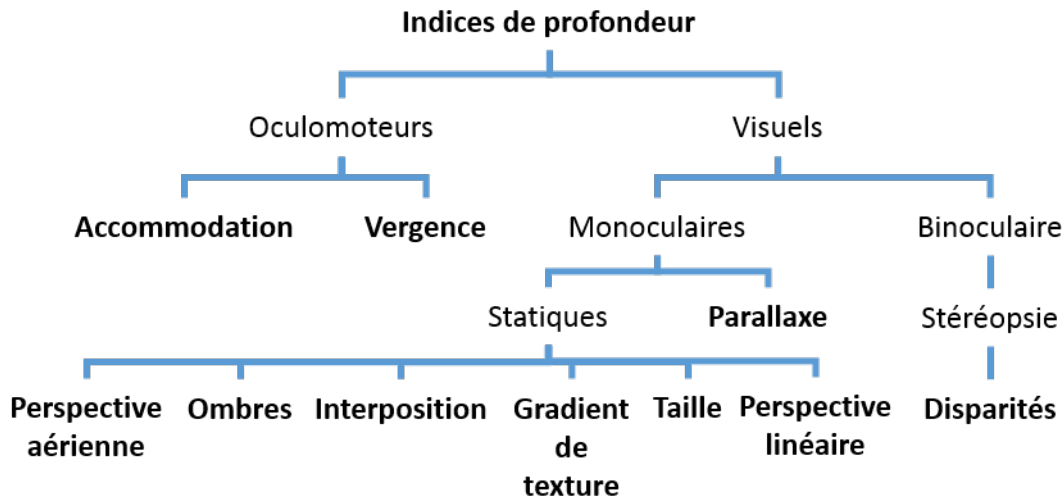


FIGURE 5.1 – Indices visuels de perception de la profondeur

deux points permet au cerveau de comparer leurs positions respectives. Au niveau technologique cet indice est apporté par la stéréoscopie. Pour plus d'informations sur l'indice binoculaire de profondeur, on pourra se reporter à [Glassner, 1995] (en anglais).

La *parallaxe*, ou parallaxe de mouvement, est un indice temporel, c'est à dire qu'il ne fonctionne pas à un instant t donné mais plutôt sur une période de temps Δt . En effet, la parallaxe est l'effet sur le cerveau d'un changement de point de vue : le cerveau analyse les différences entre les images n et $n + 1$ et en fonction des quantités et des vitesses de déplacement en déduit les profondeurs des objets. Lorsque qu'un observateur bouge la tête en gardant le même point de fixation, tous les objets entre le point de fixation et l'observateur vont bouger avec un gradient de vitesse basé sur la distance au point de fixation (plus l'objet est éloigné, plus il va vite). Tous les points derrière le point de fixation bougeront aussi mais avec le gradient de vitesse inverse. La parallaxe est assurée par la capture et l'intégration du mouvement de la tête et/ou des yeux de l'observateur dans le calcul de l'image.

Parmi les indices statiques, l'*interposition* (ou occultation) est assez simple et révélateur : si un objet masque (partiellement) un autre, alors l'objet masqué à une profondeur supérieure à l'objet masquant. Cet indice est notamment très utilisé en informatique graphique dans le pipeline de rendu¹ au moment de calculer une image : tous les objets masqués sont ignorés pour le rendu de l'image (ce qui permet un gain de temps énorme, notamment sur des scènes complexes) et les objets partiellement masqués voient leur géométrie modifiée afin de ne garder que la (les) partie(s) visible(s).

La *taille* est un autre indice, basé cette fois sur notre expérience d'objets familiers dont on connaît ou dont on visualise la taille. Si une voiture est vue minuscule, par expérience, on saura que c'est parce que la voiture est loin. Cet indice ne marche qu'avec des objets que l'on connaît déjà et peut être berné assez facilement (comme par exemple avec l'illusion d'optique de la chambre d'Ames).

1. Pour plus d'informations sur le pipeline de rendu : *Rendering Pipeline Overview*, https://www.opengl.org/wiki/Rendering_Pipeline_Overview (Juillet 2016, en anglais).

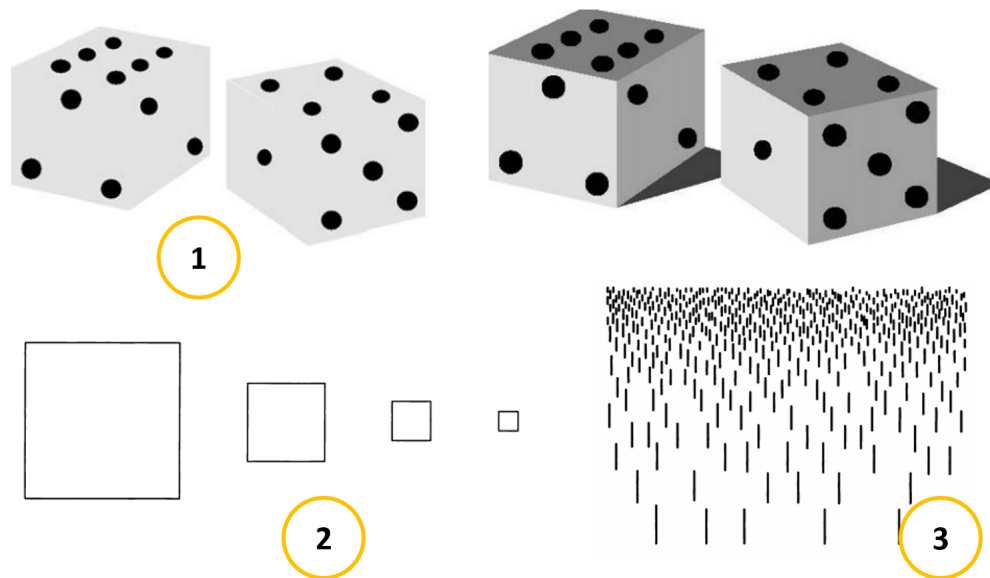


FIGURE 5.2 – Illustration d’indices de profondeur : ombres (1, image tirée de [ANSES, 2014]), taille (2) et gradient de profondeur (3, images tirées de [Glassner, 1995]).

L’*ombre* permet localement de donner des indices flagrants sur la profondeur de l’objet (cf. Fig. 5.1).

Enfin il existe un certain nombre d’indices statiques monoculaires [Fuchs *et al.*, 2003; Glassner, 1995] que l’on peut regrouper sous la dénomination « Perspective ». Certains de ces différents types de perspective sont illustrés Fig. 5.2.

Le *gradient de texture* consiste à un rapprochement apparent (un écrasement des distances relatives) entre les objets de plus en plus lointains.

La *perspective aérienne* fonctionne pour les grandes distances uniquement : plus un objet va s’éloigner de l’observateur, plus sa couleur va perdre en intensité et fondre vers le bleu-gris (couleur de l’atmosphère), typiquement le cas des montagnes ou d’un paysage que l’on voit à l’horizon.

La *perspective linéaire* est la perspective bien connue avec lignes de fuite : plus un objet s’éloigne, plus il semble rapetisser.

CHAPITRE

6

CONTRASTE

6.1 Définitions mathématiques

Tout d'abord, il convient de définir le contraste comme une « opposition de deux choses, l'une faisant ressortir l'autre »². Deux définitions plus spécifiques sont « effet subjectif d'une apposition quantitative de couleurs, par exemple des stimulations sensorielles juxtaposées dans l'espace (contraste simultané) ou dans le temps (contraste successif) »³ et « variation relative de l'éclairement d'une image lorsqu'on se déplace à l'intérieur de cette image »⁴. L'opposition se ferait ici entre le blanc et le noir pour avoir la valeur maximale du contraste.

Ces définitions sont toutefois insuffisantes ou tout du moins inutilisables dans le monde de la vision et de l'imagerie informatique. Il faut alors théoriser plus précisément le concept de contraste et le représenter mathématiquement pour à la fois pouvoir le mesurer mais aussi avoir plus de contrôle sur sa caractérisation et son obtention. Il existe pour ce faire au moins 3 méthodes analytiques, résumées ci-après :

- Le contraste de Michelson [Fuchs *et al.*, 2003; Michelson, 1995; Winkler, 1999].
- Le contraste de Weber [Winkler, 1999; ?].
- Le contraste de Peli [Peli, 1990; Winkler, 1999; ?].

2. Contraste. (s.d.). Dans *Dictionnaire Larousse en ligne*. Repéré à <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/contraste/18688>

3. Contraste des couleurs. (s.d.). Dans *Dictionnaire Larousse en ligne*. Repéré à <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/contraste/18688/locution>

4. Contraste d'une image optique. (s.d.). Dans *Dictionnaire Larousse en ligne*. Repéré à <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/contraste/18688/locution>

Premièrement, le contraste de Michelson est défini par l'Eq. 6.1, avec L_{max} la valeur maximale de la luminance de l'image, et L_{min} la valeur minimum. Le contraste de Michelson prend sa valeur dans l'intervalle $[0; 1]$.

$$C_{Michelson} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (6.1)$$

Le contraste de Weber est quant à lui défini tel que dans l'Eq. 6.2. ΔL étant la plus petite différence de luminance visible, pour une luminance L donnée. A la différence du contraste de Michelson, le contraste de Weber prend ses valeurs dans l'intervalle $[-1; +\infty[$.

$$C_{Weber} = \frac{\Delta L}{L} \quad (6.2)$$

Enfin, Peli a proposé un modèle de contraste pour les images complexes basé sur une analyse fréquentielle de l'image (cf. Eq. 6.3). Avec $BP_i(x, y)$ la bande passante de l'image i et $LP_i(x, y)$ l'énergie sous la fréquence de coupure.

$$C_i(x, y) = \frac{BP_i(x, y)}{LP_i(x, y)} \quad (6.3)$$

Malgré tout, il n'existe pas (encore) de méthode parfaite et définitive pour mesurer le contraste dans les images complexes de type image de simulateur [?]. Les définitions analytiques vues à l'instant sont valables pour des images très simples et statiques.

6.2 Lois de comportement

Le calcul du contraste en lui même ne suffit pas, il faut aussi savoir comment celui évolue en fonction de la luminance de l'écran : il semble assez naturel qu'à très forte luminance la capacité à distinguer un certain niveau de contraste ne soit pas la même qu'à très faible luminance. On recense ici trois modèles de comportement pour le contraste issus de la littérature :

- La fraction de Weber¹.
- Le modèle de Blackwell [Blackwell, 1981].
- Le modèle de Ward [Ward, 1994].

Ces modèles, notamment la fraction de Weber, ne sont valables que dans le domaine photopique (lumière du jour) et sont à utiliser avec prudence. A notre connaissance, il n'existe pas de modèle de comportement de la vision du contraste dans les domaines spécifiques du mésopique et du scotopique.

1. Serge Bertorello, *Notions d'Optique - La Vision*, <http://serge.bertorello.free.fr/optique/vision/vision.html> (Juillet 2016)

Surement le modèle le plus connu et le plus utilisé, la fraction de Weber est dans la continuité du contraste de Weber défini précédemment. Si il s'applique notamment au contraste, ce modèle est en fait utilisable pour n'importe quel type de stimulus et est assez générale. La fraction est simplement posée telle que dans Eq. 6.4, avec k une constante, ΔI la plus petite différence d'intensité perceptible et I l'intensité du stimulus. La valeur de k est généralement admise à 0.02.

$$\frac{\Delta I}{I} = k = 0.02 \quad (6.4)$$

De cette fraction de Weber est issue une autre loi à propos du comportement de la rétine face à une intensité lumineuse, la loi de Weber-Fechner (Eq. 6.5). Avec S la sensation perçue, I l'intensité de la stimulation et k une constante.

$$S = k \cdot \log(I) \quad (6.5)$$

En 1981, la CIE a adopté un modèle établi par Blackwell et destiné au comportement du contraste en fonction de la luminance uniquement. Ce modèle donne la plus petite différence de luminance perceptible ΔL pour une luminance moyenne donnée L_a (Eq. 6.6). Ici, $L_a \pm \Delta L$ est perceptible tant que $L_a \pm \epsilon$ alors $\epsilon < \Delta L$ ne l'est pas.

$$\Delta L(L_a) = 0.0594(1.219 + L_a^{0.4})^{2.5} \quad (6.6)$$

Enfin, le modèle de Ward donne un lien direct (linéaire) entre la différence minimale perceptible de luminance qui serait perçue dans le monde réel (L_{wa}) et sont équivalent sur un dispositif d'affichage L_{da} (Eq. 6.7). Le coefficient de linéarité m est donné par l'Eq. 6.8.

$$\Delta L(L_{da}) = m \cdot \Delta L(L_{wa}) \quad (6.7)$$

$$m = \left[\frac{1.219 + (L_{da})^{0.4}}{1.219 + (L_{wa})^{0.4}} \right]^{2.5} \quad (6.8)$$

Une fois ces modèles analytiques mis en place, on se rend compte assez facilement de leur lourdeur et de incapacité à s'adapter à des situations concrètes, notamment dans le domaine de l'informatique temps réel. Nous verrons donc dans un prochain chapitre d'autres pistes et d'autres moyens plus pratiques de quantifier le contraste.

CHAPITRE

7

INFLUENCES PHYSIOLOGIQUES

Outre les maladies ou autres défauts oculaires qui ne seront pas abordés ici, il existe un certain nombre de paramètres liés au corps humain qui influent sur la qualité de perception des images projetées par le dispositif immersif d’affichage. On retrouve, au niveau de précision qui nous intéresse, principalement des influences morphologiques (au niveau du visage) ou en terme d’âge de l’observateur. Mais on peut par exemple noter que la sensibilité au contraste est dépendante des conditions d’expérimentations évidemment, mais aussi de facteurs ophtalmologiques (myopie, éblouissement rétinien, cataracte, amblyopie, dégénération de la macula avec l’âge, hyper-tension oculaire, glaucome, sécheresse oculaire) mais aussi de facteurs neurologiques (lésions cérébrales, scléroses, maladie de Parkinson et schizophrénie), ou encore de facteurs liés à la prise de médicaments [Pelli & Bex, 2013]. Nous nous plaçons évidemment dans le cas où le sujet est sain.

7.1 Variations morphologiques

Les influences morphologiques sont très nombreuses au niveau du visage et plus ou moins faciles à caractériser et à traiter. On retrouve par exemple la distance inter-oculaire (distance entre le centre des pupilles), profondeur des yeux, non-horizontalité de la droite passant par le centre des pupilles, glissement des lunettes pendant l’utilisation, position des oreilles par rapport au nez pour la poste des lunettes 3D, écart de position entre une première et une seconde mise de lunettes, la position du casque immersif sur le visage ... tout ce qui fait de l’observateur humain un observateur symétriquement et géométriquement imparfait.

On développera ici le cas simple de la distance inter-oculaire. Il apparaît que lorsque l’on présente les mêmes images stéréo à deux personnes différentes, la profondeur stéréoscopique des objets proches n’est pas perçue de manière égale. On prend l’exemple l’image

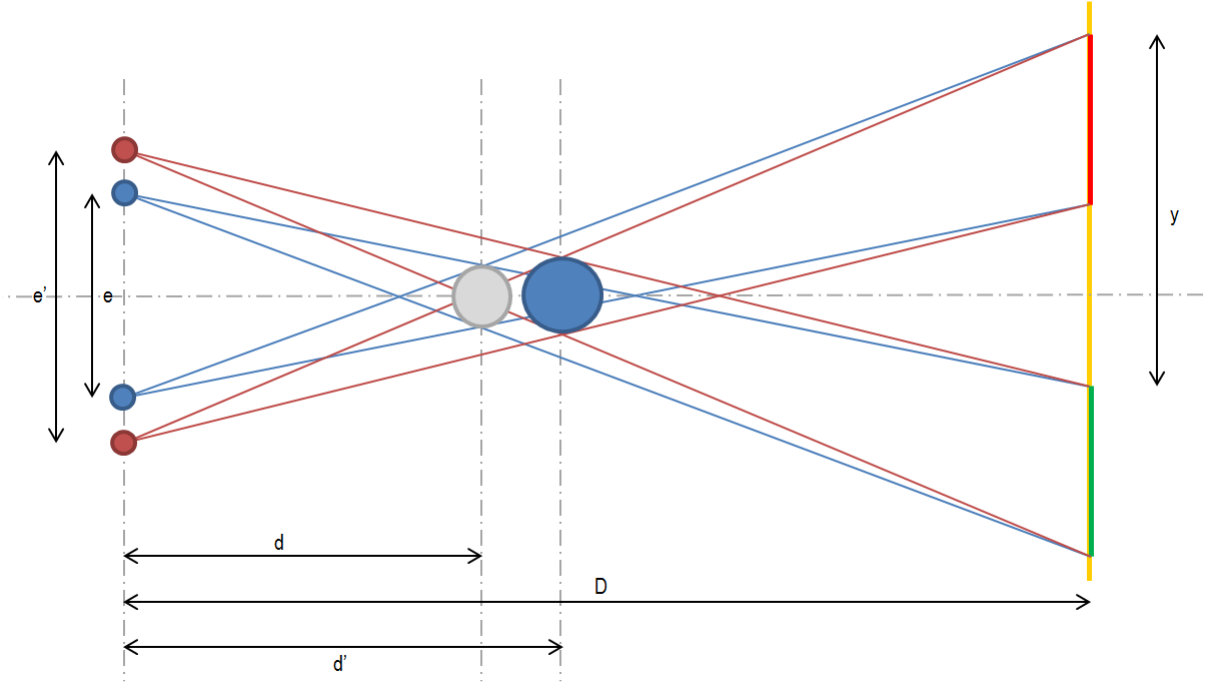


FIGURE 7.1 – Schématisation de la différence de profondeur stéréoscopique perçue en fonction de la distance interoculaire

d'un volant de virtuel normalement paramétré pour apparaître confondu avec le volant réel du simulateur de conduite. D'aucuns verront effectivement le volant là où il est sensé être, tandis que d'autres verront l'image légèrement en avant du volant et d'autres la verront légèrement en retrait. Cet écart peut être extrêmement gênant et s'explique notamment par l'écart de distance inter-pupillaire entre les différents observateurs. Il serait cependant intéressant de comparer l'influence des différentes influences physiologiques vues précédemment afin de les hiérarchiser et éventuellement d'en négliger certaines.

Les longueurs ici évoquées font référence à la Fig. 7.1. Pour un individu A qui a une distance interoculaire e , on projette sur les murs du CAVE, où dans un visio-casque, à distance D , un couple d'images stéréoscopiques (ici représentées par les segments rouge et bleu). L'image reconstruite par le cerveau est vue à une distance d de l'individu. Les images œil gauche et œil droit sont dissociées d'une distance y . En gardant les mêmes images, un individu B avec une distance interoculaire e' se positionne au même endroit dans le CAVE. C'est à ce niveau là qu'intervient la différence de perception, et le second individu verra l'objet virtuel non pas à une distance d mais à une distance d' qui peut être supérieure ou inférieure à d .

En utilisant les règles élémentaires de trigonométrie (et après simplification), on trouve que la différence de distance de l'objet virtuel entre les deux individus se note de la manière suivante (Eq. 7.1) :

$$\Delta d = \frac{(D - d)(e + \Delta e) - y \cdot d}{y + e + \Delta e} \quad (7.1)$$

La Fig. 7.2 est un abaque partiel pour une configuration donnée et pour le spectre des distances inter-oculaires, de l'écart de profondeur perçue entre l'observateur A et l'obser-

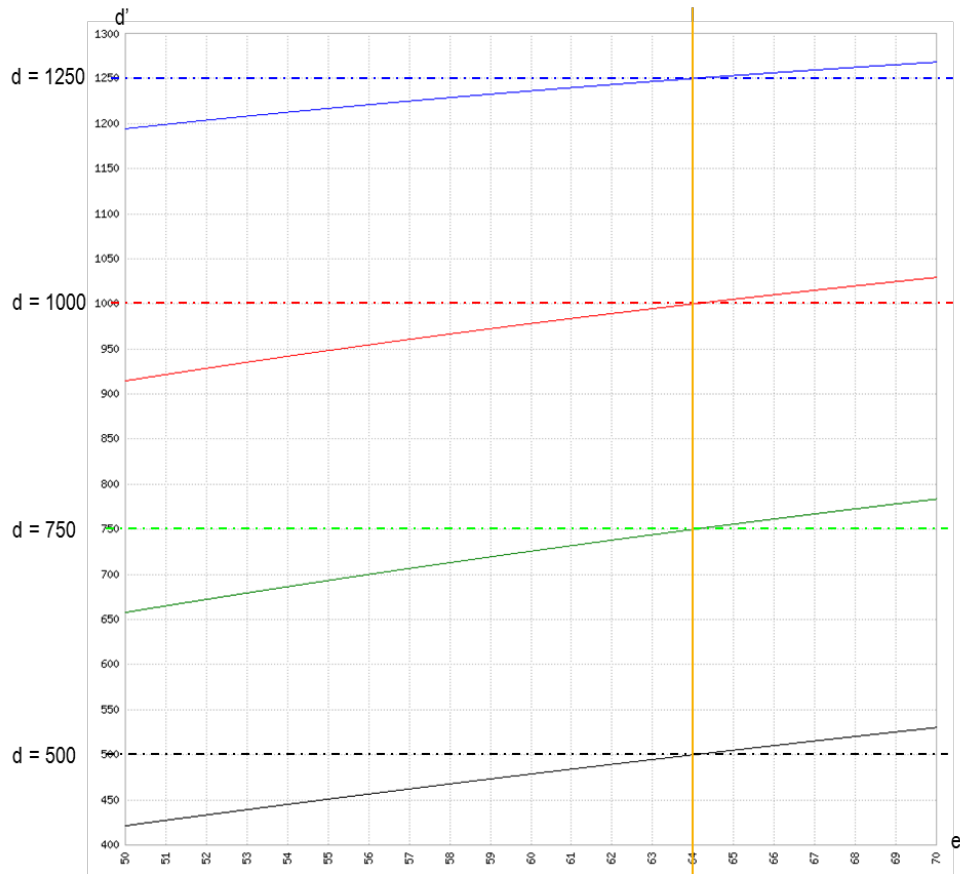


FIGURE 7.2 – Abaques de la nouvelles distance perçue en fonction de la distance inter-oculaire

vateur B pour un même jeu d'images stéréoscopiques.

L'abaque est tracé dans la configuration spécifique avec des images projetées à la distance $D = 1.5m$ et pour des distances de perception de l'objet en 3D de $d = 50cm, 75cm, 1m$ et $1m25$. De même, on se place dans le cas général, et dans les pratiques usuelles en 3D échelle 1 : 1, la distance interoculaire initiale (individu A) utilisée pour calculer le couple d'images stéréoscopiques est de 64 mm, qui est la distance interoculaire moyenne chez les hommes [Dodgson, 2004].

Dans le cas idéal, celui où la distance inter-oculaire n'influerait pas sur la perception de la profondeur, les images calculées pour 64mm (trait orange vertical) seraient vues toujours à la même distance quelque soit la distance interoculaire (traits horizontaux en pointillés). Mais la géométrie montre bien que la réalité est tout autre (traits pleins).

Les résultats qui émergent des courbes sont les suivants. Si l'individu A perçoit l'objet virtuel à une distance de 1m (courbes rouges, Cf. 7.2), un individu B avec une distance oculaire de 60mm (distance inter-oculaire moyenne chez les femmes [Dodgson, 2004]) verra le même objet virtuel à 980mm (donc légèrement plus proche), soit avec un écart de 2cm par rapport à l'observateur calculé.

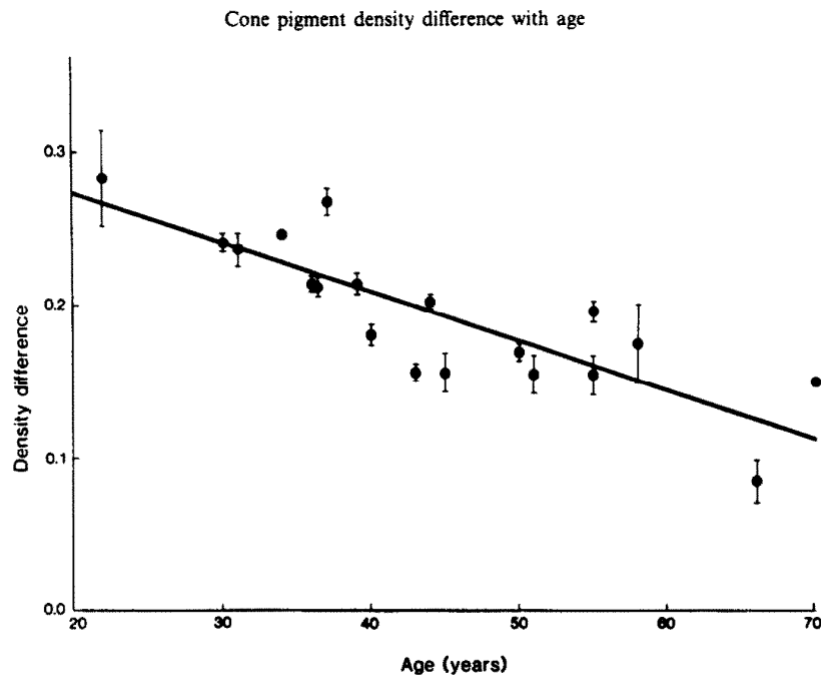


Fig. 1. Cone pigment density difference as a function of subject's age. The density difference is for the spectral peak at 560 nm and is from the central 2 degrees of visual field. Points are the mean \pm SEM for multiple bleaches per subject.

FIGURE 7.3 – Densité des cônes en fonction de l'âge (figure tirée de [Kilbride *et al.*, 1986])

7.2 Âge

L'ergonomie du système d'affichage et la physiologie du visage ne sont pas les seuls facteurs influençant la perception. Un certain nombre d'autres paramètres entrent en jeu, comme notamment le genre (homme ou femme) pour la vision des couleurs [Fairchild, 2005] mais surtout, pour la quasi totalité des grandeurs de la vision : l'âge de l'observateur.

On peut dès lors évoquer la modification, avec l'accumulation des années, de facteurs comme le diamètre pupillaire, l'acuité visuelle ou la sensibilité au contraste [Owsley *et al.*, 1983] (Cf. Fig. 3.10), la réduction de la capacité à extraire des informations dans le champ de vision [Ball *et al.*, 1988; Gross *et al.*, 2008; Rogé & Pébayle, 2009; Rogé *et al.*, 2004; Sekuler & Bennett, 2000], la qualité de l'image rétinienne [Artal *et al.*, 1993], la densité de cônes dans la fovéa [Kilbride *et al.*, 1986], le structure de l'œil et du cristallin [Cook *et al.*, 1994].

Par ailleurs, on note les excellentes vidéos de Craig Blackwell sur le thème du vieillissement de l'œil et de la vision¹.

La finalité (ici) de toutes ces études sur le vieillissement de l'œil est de pouvoir intégrer les résultats dans un modèle de vision. Nous verrons dans la prochaine section ce qu'est et de quoi peut être composé un modèle de vision.

1. Craig Blackwell. 3 décembre 2014. Aging Eye 1 : Vision [Vidéo en ligne]. Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=FtcZ4an-VGo>

Bibliographie

- ANSES. 2014. *Effets Sanitaires Potentiels des Technologies Audiovisuelles en 3D Stéréoscopique*. Rapport d'Expertise Collective.
- Artal, Pablo, Ferro, Manuel, Navarro, Rafael, & Miranda, Ismael. 1993. Effects of aging in retinal image quality. *JOSA A*, **10**(7), 1656–1662.
- Aurat, David. 2016. *Immersion Visuelle Tridimensionnelle Haute Performance par Suivi du Mouvement des Yeux*. Informatique Temps Réel, Robotique & Automatique, Université de Recherche Paris Sciences et Lettres (PSL Research University), Paris, France.
- Ball, Karlene K., Beard, Bettina L., Roenker, Daniel L., Miller, Richard L., & Griggs, David S. 1988. Age and visual search : expanding the useful field of view. *JOSA A*, **5**(12), 2210–2219.
- Bear, Mark F, Connors, Barry W, & Paradiso, Michael A. 2007. *Neurosciences : à la découverte du cerveau*. Paris : Éditions Pradel.
- Beretta, Giordano. 2000. *Understanding Color*.
- Bezzubik, V. V., & Belashenkov, N. R. 2015. Modeling the contrast-sensitivity function of the human visual system. *Journal of Optical Technology*, **82**(10), 711–717.
- Blackwell, H. R. 1981. *An Analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance*. Publication CIE, nos. no. 19/2.1–19/2.2. Paris, France : Bureau central de la CIE.
- Burkhardt, J.-M. 2003. Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le travail humain*, **Vol. 66**(1), 65–91.
- Burkhardt, Jean-Marie, Lourdeaux, Domitile, & Fuchs, Philippe. 1999 (Dec.). Conception d'un système de RV pour la formation des agents de conduite aux opérations en milieu ferroviaire.
- Cook, Christopher A., Koretz, Jane F., Pfahnl, Arnold, Hyun, John, & Kaufman, Paul L. 1994. Aging of the human crystalline lens and anterior segment. *Vision Research*, **34**(22), 2945–2954.
- Damelincourt, Jean-Jacques, Zissis, Georges, Corbé, Christian, & Paule, Bernard. 2010. *Eclairage d'intérieur et ambiances visuelles*. Optique & Vision. Paris : Tec&Doc.
- Devisme, Céline. 2004. *Optimisation du Traitement des Indices de Profondeur pour Application à la Vision Artificielle - Cas de la Disparité Horizontale*. Mémoire.
- D'hondt, Fabien. 2011. *Emotion et Espace Visuel : Approche Neuromagnétique, Neurosomatique et Comportementale*. Ph.D. thesis.
- Dobelle, Wm. H. 2000. Artificial Vision for the Blind by Connecting a Television Camera to the Visual Cortex :. *ASAIO Journal*, **46**(1), 3–9.
- Dodgson, Neil A. 2004 (May). Variation and Extrema of Human Interpupillary Distance.
- Driscoll, Walter G., Vaughan, William, & Optical Society of America (eds). 1978. The Eyes and Vision. In : Driscoll, Walter G., Vaughan, William, & Optical Society of America (eds), *Handbook of optics*. New York : McGraw-Hill.

- Fairchild, Mark D. 2005. Human Color Vision. *Pages 1–34 of : Color appearance models*, 2nd ed edn. Wiley-IS&T series in imaging science and technology. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ : J. Wiley.
- Ferwerda, James A., Pattanaik, Sumanta N., Shirley, Peter, & Greenberg, Donald P. 1996. A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis. ACM.
- Fuchs, Philippe, Moreau, Guillaume, & Berthoz, Alain. 2003. *Le Traité de la Réalité Virtuelle. Volume 1*. Vol. 1. Paris : Les Presses de l'École des Mines.
- Glassner, Andrew S. 1995. *Principles of Digital Image Synthesis*. The Morgan Kaufmann series in computer graphics and geometric modeling. San Francisco : Morgan Kaufmann.
- Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. 1991. A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature*, **349**(6305), 154–156.
- Gross, Herbert, Blechinger, Fritz, Achtner, Bertram, & Gross, Herbert. 2008. Human Eye. In : *Survey of Optical Instruments*. Handbook of Optical Systems, no. ed. by Herbert Gross ; Vol. 4. Weinheim : Wiley-VCH.
- Habekost, Martin. 2013. Which Color Differencing Equation Should Be Used? *International Circular of Graphic Education and Research*, 20–33.
- Halonen, L., & Puolakka, M. 2011. CIE and Mesopic Photometry. CIE publication. Vienna : CIE Central Bureau.
- Hoorn, J.F., Konijn, E.A., & Van der Veer, G.C. 2003. Virtual Reality : Do Not Augment Realism, Augment Relevance. *Upgrade-Human-Computer Interaction : Overcoming Barriers*, **4**(1), 18–25.
- James, Thomas W., & Kim, Sunah. 2010. Dorsal and Ventral Cortical Pathways for Visuo-haptic Shape Integration Revealed Using fMRI. *Pages 231–250 of : Kaiser, Jochen, & Naumer, Marcus Johannes (eds), Multisensory Object Perception in the Primate Brain*. New York, NY : Springer New York.
- Judd, Deane Brewster, & Wyszecki, Günter. 1975. *Color in Business, Science, and Industry*. 3d ed edn. Wiley series in pure and applied optics. New York : Wiley.
- Kilbride, Paul E., Hutman, Lucinda P., Fishman, Marlene, & Read, John S. 1986. Foveal cone pigment density difference in the aging human eye. *Vision Research*, **26**(2), 321–325.
- Le Grand, Yves. 1972. *Optique Physiologique : Lumière et Couleurs*. 2 edn. Vol. 2. Masson & Cie.
- Liou, Hwey-Lan, & Brennan, Noel A. 1997. Anatomically Accurate, Finite Model Eye for Optical Modeling. *Journal of the Optical Society of America A*, **14**(8), 1684.
- Michelson, Albert A. 1995. *Studies in optics*. Dover ed edn. New York : Dover Publications.
- Mishkin, Mortimer, Ungerleider, Leslie G., & Macko, Kathleen A. 1983. Object vision and spatial vision : two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, **6**(Jan.), 414–417.
- Neveu, Pascaline. 2012. *Impact des Dispositifs de Visualisation en Relief sur les Composantes Oculomotrices d'Accommodation et de Vergence*. Psychologie, Université de Paris 8 - Vincennes - Saint-Denis.

- Ogle, Kenneth N. 1968. Optics : An Introduction for Ophthalmologists. *ResearchGate*, Jan.
- Owsley, Cynthia, Sekuler, Robert, & Siemsen, Dennis. 1983. Contrast sensitivity throughout adulthood. *Vision Research*, **23**(7), 689–699.
- Patrick, John. 1992. *Training : Research and practice*. Academic Press.
- Pattanaik, Sumata N., Ferwerda, James A., Fairchild, Mark D., & Greenberg, Donald P. 1998. A Multiscale Model of Adaptation and Spatial Vision for Realistic Image Display.
- Peli, Eli. 1990. Contrast in Complex Images. *Journal of the Optical Society of America A*, **7**(10), 2032.
- Pelli, Denis G., & Bex, Peter. 2013. Measuring contrast sensitivity. *Vision Research*, **90**(Sept.), 10–14.
- Robertson, A. R. 1990. Historical development of CIE recommended color difference equations. *Color Research & Application*, **15**(3), 167–170.
- Rogé, Joceline, & Pébayle, Thierry. 2009. Deterioration of the useful visual field with ageing during simulated driving in traffic and its possible consequences for road safety. *Safety Science*, **47**(9), 1271–1276.
- Rogé, Joceline, Pébayle, Thierry, Lambilliotte, Elina, Spitzenstetter, Florence, Giselsbrecht, Danièle, & Muzet, Alain. 2004. Influence of age, speed and duration of monotonous driving task in traffic on the driver's useful visual field. *Vision Research*, **44**(23), 2737–2744.
- Schanda, János, & International Commission on Illumination (eds). 2007. *Colorimetry : Understanding the CIE System*. [Vienna, Austria] : Hoboken, N.J : CIE/Commission internationale de l'éclairage ; Wiley-Interscience.
- Sekuler, Allison B., & Bennett, Patrick J. 2000. Effects of Aging on the Useful Field of View. *Experimental Aging Research*.
- Sharma, Gaurav, & Bala, Raja. 2013. *Digital color imaging handbook*. OCLC : 856194495.
- Sharma, Gaurav, Wu, Wencheng, & Dalal, Edul N. 2005. The CIEDE2000 color-difference formula : Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application*, **30**(1), 21–30.
- Stoffregen, Thomas A., Bardy, Benoit G., Smart, L. J., & Pagulayan, Randy. 2003. One the Nature and Evaluation of Fidelity in Virtual Environments. In : *Virtual and Adaptive Environments*.
- Sève, Robert. 2009. *Science de la couleur aspects physiques et perceptifs*. Marseille : Chalagam éd. OCLC : 690444017.
- Ungerleider, Leslie G., & Mishkin, Mortimer. 1982. Two Cortical Visual Systems. In : Ingle, David, Goodale, Melvyn A., & Mansfield, Richard J. W. (eds), *Analysis of visual behavior*. Cambridge, Mass : MIT Press.
- Vidal, Q., Michelin, S., Laborie, B., & Kemeny, A. 2016. Color-Difference Assessment and Enhancement for Driving Headlight Simulation. *SIMULATION*, **92**(5), 427–435.

- Wandell, Brian A. 1995. *Foundations of vision*. Sunderland, Mass : Sinauer Associates.
- Ward, Greg. 1994. A Contrast-Based Scalefactor for Luminance Display. *Pages 415–421 of* : Heckbert, Paul S. (ed), *Graphics gems IV*. The Graphics gems series. Boston : AP Professional.
- Watson, Andrew B., & Solomon, Joshua A. 1997. Model of visual contrast gain control and pattern masking. *Journal of the Optical Society of America A*, **14**(9), 2379.
- Winkler, Stefan. 1999. Issues in vision modeling for perceptual video quality assessment. *Signal Processing*, **78**(2), 231–252.
- Wyszecki, Günter, & Stiles, W. S. 2000. *Color Science : Concepts and Methods, Quantitative Data, and Formulae*. Wiley classics library ed edn. Wiley classics library. New York : John Wiley & Sons.