



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse III – Paul Sabatier
Discipline ou spécialité : *Physique de la lumière et perception visuelle*

Présentée et soutenue par *Mme AREXIS BOISSON Lydie*
Le *19 juin 2014*

Titre : *Etude et optimisation d'un système d'éclairage efficace énergétiquement et adapté aux besoins de ses utilisateurs (santé, sécurité et qualité de vie)*

JURY

M. ZISSIS Georges : Professeur, Responsable du groupe Lumière et Matière, LAPLACE, Université Toulouse 3, Paul Sabatier - Directeur de thèse

M. FONTOYNONT Marc : Professeur, Department of Energy and Environment, Danish Building Research Institute, Aalborg University, Danmark - Rapporteur

M. PICAUD Serge : Directeur de recherche, INSERM, CNRS, UPMC, Institut de la vision - Rapporteur

Mme THELLIER Françoise : Professeur, Laboratoire PHASE, Université Toulouse 3, Paul Sabatier - Examineur

M. LABAYRADE Raphaël : Directeur de recherche, LGCB, ENTPE, Vaulx-en-Velin - Examineur

Ecole doctorale : *GEET*
Unité de recherche : *UMR 5213*
Directeur(s) de Thèse : *M. ZISSIS Georges*
Rapporteurs : *M. FONTOYNONT Marc - M. PICAUD Serge*

RESUME

La perception visuelle de la lumière est un sujet qui interroge depuis des années. Dans cette recherche, nous nous attachons plus particulièrement au confort visuel des être humains soumis à un papillotement de lumière ou flickering, pouvant présenter des impacts sanitaires non négligeables. Mais comprendre la perception visuelle du papillotement de lumière, aussi appelé « contraste de luminance ou chromatique temporel », implique de multiples pré-requis. C'est pourquoi, tout au long de ce travail de recherche, nous avons adopté une approche pluridisciplinaire, et faisons appel à des connaissances relatives aux êtres humains : physiologie de l'œil et mécanismes de perception, neurophysiologie, psychologie cognitive, sociologie ; mais également des connaissances relatives à la physique : sources de lumière, photométrie et colorimétrie, notions d'optique géométrique, etc.

Le terme « confort » étant souvent utilisé à mauvais escient, nous avons tout d'abord réfléchi à définir avec exactitude les notions de confort en les distinguant des termes « qualité de vie » et « bien-être », trop souvent pris pour synonymes. Afin d'y parvenir, nous avons basé notre étude sur une approche cognitive, et nous nous sommes particulièrement intéressés au cas du confort visuel, en relation avec notre thématique de recherche.

Ensuite, une campagne d'expérimentations sur le papillotement de lumière a été menée. Elle a consisté en l'étude phénoménologique de la perception visuelle du papillotement de lumière dans différents contextes : couleur de l'environnement et axes de perception visuelle pour différentes configurations expérimentales. Pour cela, un dispositif expérimental et interactif a été réalisé. Afin de générer le papillotement de lumière, des diodes électroluminescentes (LEDs) ont été utilisées, et un boîtier de commande a permis la variation de deux paramètres particuliers : la fréquence et le rapport cyclique. Nous avons ainsi créé un signal PWM, et avons fait en sorte que le stimulus soit une lumière indirecte à champ large. De part le logiciel associé aux boîtiers de commande, de nombreux scénarii ont pu être présentés à des observateurs volontaires qui ont exprimé leur ressenti quant à leur perception du papillotement de lumière. Les observateurs ont des caractéristiques visuelles similaires (vision emmétrope) et sont âgés entre 20 et 39 ans. Des expériences préliminaires destinées à caractériser la vision amétrope ont également été réalisées.

Afin de construire des résultats synthétiques à partir des données expérimentales, une méthode d'optimisation a été utilisée et a mis en évidence des couples optimaux de solutions (fréquence et rapport cyclique) quelle que soit la couleur de l'environnement et quel que soit l'axe de perception visuelle. Nous nous sommes ensuite appuyés sur ces résultats pour mettre en place des graphiques de paramètres physiques de confort visuel du papillotement de lumière.

Enfin, une étude applicative du papillotement de lumière a été menée. Elle a consisté en la comparaison de la dégradation colorimétrique de tableaux de musées, via échantillons normalisés, éclairés soit par une lumière continue, soit par une lumière pulsée, à éclairage moyen constant. Les dégradations se sont révélées être du même ordre au bout de 635000 lx.h. L'effet Broca Sulzer ayant été vérifiée dans

le cadre de nos expériences (la brillance ressentie est plus grande que la brillance réelle) a ainsi permis d'envisager des économies d'énergie.

Mots clés : éclairage, papillotement de lumière, confort, bien-être, qualité de vie, santé, brillance, LED, fréquence et rapport cyclique, optimisation multi-critère, économie d'énergie.

REMERCIEMENTS

Je tenais à remercier tous ceux qui m'ont soutenu, encouragé, et aidé dans cette aventure.

Tout d'abord, j'exprime toute ma gratitude aux cinq membres du jury. Merci à Georges Zissis, mon directeur de thèse, responsable du groupe Lumière et Matière du laboratoire LAPLACE, qui m'a donné goût à l'éclairage, et m'a aussi donné l'opportunité de me réaliser dans cette thématique « lumière et santé » qui me tient à cœur et me passionne. Il a su rester disponible, en me guidant tout en me faisant confiance dans mes travaux, me laissant autonome, et me donnant des responsabilités. Merci pour ces merveilleuses opportunités de déplacements tant en France qu'à l'étranger : Taiwan, Japon et Grèce. Ces rencontres exceptionnelles avec des spécialistes scientifiques du monde entier m'ont beaucoup apporté, et enrichi à la fois intellectuellement et personnellement. Merci également pour ses encouragements dans la voie de l'enseignement que j'ai menée en parallèle des recherches. Merci à Marc Fontoyront et à Serge Picaud de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs malgré leurs emplois du temps chargés. Merci pour leur partage et leurs précieux conseils tant dans le domaine de l'éclairage que de la physiologie de l'œil humain.

Je remercie également Raphaël Labayrade pour avoir examiné avec autant d'intérêt et de précision mes travaux, ainsi que pour ses suggestions d'investigations futures avec utilisation de la méthode d'optimisation multi-critère. Enfin, je remercie chaleureusement Françoise Thellier pour son travail d'examineur mais aussi pour son rôle de présidente du jury. Je ne serai jamais assez reconnaissante pour tout ce qu'elle m'a appris durant mon cursus de master en Energétique de l'Habitat. Merci pour sa passion, sa pédagogie, et de m'avoir sensibilisé aux notions de confort tout en conservant une vision pluridisciplinaire. Merci aussi pour son grand soutien tout au long de la thèse tant dans le domaine de la recherche que dans l'enseignement.

Je pense également à mes collègues qui ont eu la gentillesse de participer à mes expériences phénoménologiques et qui se sont montrés intéressés par mes travaux. Je citerai plus particulièrement le service mécanique avec Jean-Luc Bonneval et le service électronique, avec Jacques Salon, Nordine Ouahhabi, et Stéphane Martin. Ils se sont toujours démenés pour mener à bien la conception expérimentale, et leur sympathie et bonne humeur font chaud au cœur. Merci à tout le groupe LM du laboratoire, en particulier à Laure Barreyre-Pandele et Ikbal Marghad pour leur soutien de tous les jours, et leur participation active. Je remercie également le grand Michel Aubes, Leena Tähkämö, Spiros Kitsinelis, Yuan Zhang, Amel Zerrouki, Angel Barroso, Juan Carlos Penafiel, Tamara Huete, Arezki Toumi. Merci aussi à mon tuteur d'enseignements Yann Cressault, et Laurent Canale pour sa relecture professionnelle. Merci aussi aux collègues du corps enseignant de la filière Energétique de l'Habitat, pour leur gentillesse, conseils précieux, et respect de mon travail. Je citerai principalement Françoise Thellier, Jean-Pierre Bedrune, Bérangère Lartigue, Sandra Spagnol, Jean-Michel Baleynaud, Etienne Bertaud, Xavier Jacob, sans oublier Mathieu Bonte.

Je tenais également à remercier les collaborateurs extérieurs. Merci aux Professeurs Ching-Cherng Sun et Yi-Chun Chen, ainsi que leurs étudiants du Département d'Optique et Photonique du National Central University à Taiwan, pour leurs échanges sur la technologie des LEDs et la

modélisation de l'œil humain. Merci au professeur Hideki Motomura et à ses étudiants du Département de Génie Electrique et Electronique de l'université d'Ehime au Japon, pour ses échanges sur les expérimentations phénoménologiques existantes autour du papillotement de lumière. Merci au Professeur Francine Behar, au Docteur Charlotte Andrieu-Soler et doctorant Arthur Krigel, du Centre de Recherche des Cordeliers à l'INSERM de Paris, pour leurs explications complémentaires sur la physiologie de l'œil humain. Merci également à Jean-Jacques Ezrati, éclairagiste-conseil pour la Direction des Musées de France, pour sa collaboration lors de l'étude applicative du papillotement de lumière et éclairage fonctionnel d'œuvre d'art. Merci à Pauline Villamot, opticienne diplômée de l'Institut Supérieur d'Optique pour sa disponibilité et son aide sur l'optique, la physiologie de l'œil ainsi que l'approche des défauts visuels. Merci au Docteur Céline Villa, ingénieur de recherche en éclairage et visibilité LEPSIS IFSTTAR à Champs-sur-Marne, grâce à qui l'analyse de mes résultats phénoménologiques via méthode d'optimisation multi-critère a été possible. Je lui suis très reconnaissante de son aide, de son efficacité et de sa sympathie. Merci à Laurent Massol, président de Led Engineering Development, et Sounil Bhosle, président d'Oliscie, pour leurs échanges et conseils techniques tout au long de ma thèse. Merci à Corinne Argenty, ergonome et spécialiste en psychologie cognitive, ainsi que le Docteur en psychologie Laetitia Pirrello Parnot, pour leur aide et leur soutien dans ma réflexion cognitive liée au confort. Merci également à Caroline Crespin, présidente de Crespin lumière, et le Docteur Catherine Aventin architecte DPLG docteur en sciences pour l'ingénieur, spécialité architecture, chercheuse au LRA de l'ENSA de Toulouse, pour leurs échanges passionnants entre expertes lumière aux approches multiples.

Merci donc à tous ces collègues qui sont pour certains devenus bien plus que de simples collègues, et grâce à qui ce travail a été constructif, efficace et agréable au quotidien.

Je remercie aussi mes étudiants M1 et M2 de la filière Energétique de l'Habitat qui se sont impliqués et se sont montrés intéressés par la thématique de mes recherches et ont activement participé aux expériences phénoménologiques.

Indépendamment des rencontres professionnelles, j'ai bien sûr une pensée toute particulière pour mon mari et toute ma famille qui sont restés à l'écoute, disponibles pour m'aider et m'encourager non seulement pour ce travail de recherche, mais tout au long de mon parcours professionnel. Merci aussi pour leur bienveillance et judicieux conseils tout au long de ce morceau de vie qui fait que j'en suis là aujourd'hui, sans aucun regret sur les choix que j'ai effectués. La force qu'ils m'ont apportée fait que j'ai toujours lutté pour aller jusqu'au bout de mes projets, et comme le disait mon grand-père « un match n'est jamais fini avant la dernière seconde », précieux conseil que je m'efforce de suivre au quotidien. Je remercie mes amis les plus proches qui se sont également montrés présents et concernés par mon travail de recherche et d'enseignement.

Voilà, la phase des remerciements arrive à sa fin, aussi, pour tous ceux que j'aurais pu oublier de citer, de part le grand nombre de personnes impliquées dans cette aventure, je m'en excuse d'avance et vous remercie profondément.

Je terminerai juste par une autre de nos petites phrases favorites, et qui montre l'importance de l'entourage dans la réalisation de nos projets « Seul on est fort, ensemble on est invincible ! »

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| RESUME..... | 3 |
| REMERCIEMENTS | 5 |
| SOMMAIRE..... | 7 |
| INTRODUCTION..... | 13 |
| CHAPITRE 1 | 15 |
| LUMIERE ET CONFORT VISUEL : | 15 |
| Dimension énergétique et sociale, réflexion cognitive autour des notions de confort. | 15 |
| INTRODUCTION..... | 16 |
| I- LA LUMIERE..... | 17 |
| 1. La lumière visible et invisible | 17 |
| 2. Grandeurs photométriques et radiométriques | 19 |
| 3. Génération de la lumière artificielle | 20 |
| 4. Approche sociologique de la lumière | 21 |
| II- REFLEXION SUR LES NOTIONS LIEES AU CONFORT – CAS DU CONFORT VISUEL..... | 26 |
| 1. Le confort..... | 26 |
| 2. Le bien-être..... | 27 |
| 3. Qualité de vie | 30 |
| 4. Notions d’ambiance, productivité, sécurité..... | 30 |
| 5. Conclusion..... | 32 |
| CHAPITRE 2 | 35 |
| LUMIERE ET VISION : | 35 |
| Physiologie de l’œil humain, mécanismes de perception | 35 |
| INTRODUCTION..... | 36 |
| I. PHYSIOLOGIE DE L’ŒIL HUMAIN | 37 |
| 1. Anatomie..... | 37 |
| 2. L’œil : un système optique..... | 38 |
| II. VISION D’UN OBJET..... | 40 |
| 1. Triplet..... | 40 |
| 2. Mécanisme de la vision : approche globale..... | 40 |

| | | |
|--|---|----|
| 3. | Paramètres physiques définissant l'aspect d'un objet | 41 |
| 4. | Paramètres physiques propres à la détection d'objet..... | 42 |
| 5. | Paramètres physiologiques pour la perception d'objet | 42 |
| 6. | Performance visuelle et facteurs visuels | 44 |
| 7. | Système hiérarchique du traitement des informations visuelles | 46 |
| III. | VISION DU RELIEF..... | 47 |
| 1. | Télémétrie..... | 47 |
| 2. | Acuité stéréoscopique | 47 |
| 3. | Fusion stéréoscopique et rivalité rétinienne | 48 |
| 4. | Vision stéréoscopique et détection des contours | 49 |
| IV. | VISION DE LA LUMIERE | 50 |
| 1. | Absorption du rayonnement électromagnétique par l'œil | 50 |
| 2. | Sensibilité rétinienne à l'intensité énergétique de la lumière..... | 51 |
| 3. | Cycle de la vision..... | 53 |
| 4. | Adaptation aux variations lumineuses..... | 54 |
| V. | VISION DES COULEURS..... | 62 |
| 1. | Mécanisme de perception trichromatique..... | 62 |
| 2. | Théorie sur la vision des couleurs..... | 68 |
| VI. | VISION DU MOUVEMENT..... | 72 |
| 1. | Percevoir un mouvement | 72 |
| 2. | Mécanisme de perception | 72 |
| 3. | Le système « image-rétine »..... | 72 |
| 4. | Le système « œil-tête »..... | 74 |
| 5. | Différents types de mouvement | 74 |
| CHAPITRE 3 | | 77 |
| LUMIERE ET SENSIBILITE VISUELLE : | | 77 |
| Inconfort, gênes visuelles, pathologies..... | | 77 |
| I- | INCONFORT PAR EBLouisSEMENT | 79 |
| 1. | Différents types d'éblouissements | 79 |
| 2. | Sensibilité spectrale de l'œil et éblouissement | 79 |
| 3. | Les contrastes de luminance et dimensionnement de l'éblouissement | 79 |
| 4. | Abaques sur les facteurs d'éblouissement. | 81 |

| | | |
|------|---|-----|
| II- | INCONFORT VISUEL PAR PAPILLOTEMENT DE LUMIERE | 88 |
| 1. | Perception visuelle instationnaire (spatial et temporel) | 88 |
| 2. | Quantification du papillotement de la lumière | 88 |
| 3. | Processus visuel et neurologique..... | 92 |
| 4. | Papillotement de la lumière et sensibilité visuelle | 95 |
| 5. | Détail de quelques expériences actuelles..... | 104 |
| III- | PATHOLOGIES VISUELLES DUES A LA PERCEPTION DIRECTE DE LUMIERE | 108 |
| 1. | Lumière bleue et EPR (Epithélium Pigmentaire Rétinien) | 108 |
| 2. | Exposition aiguë au soleil: rétinite solaire | 108 |
| 3. | Exposition chronique : lien avec la DMLA (Dégénérescence Maculaire liée à l'Age) | 108 |
| 4. | Lumière artificielle des instruments ophtalmologiques | 109 |
| 5. | Exposition du soudeur | 109 |
| 6. | Exposition à des lumières artificielles courantes..... | 109 |
| 7. | Evaluation des risques de la lumière bleue | 110 |
| 8. | Impacts du papillotement de la lumière..... | 110 |
| | CHAPITRE 4 | 113 |
| | PAPILLOTEMENT DE LA LUMIÈRE : Etudes phénoménologiques, notion de brillance, étude d'une application concrète | 113 |
| | INTRODUCTION..... | 114 |
| I. | CONCEPTION EXPERIMENTALE | 115 |
| 1. | Le dispositif expérimental : paramètres techniques | 115 |
| 2. | Nos objectifs et choix expérimentaux..... | 117 |
| II. | CAMPAGNES D'EXPERIMENTATIONS SUR L'ETRE HUMAIN : ETUDES PHENOMENOLOGIQUES.. | 123 |
| 1. | Etudes préliminaires : Papillotement de la lumière sur fond sombre et fond blanc..... | 123 |
| 2. | Etudes Approfondies : Papillotement de la lumière sur différents fonds (sombre, blanc et colorés)..... | 125 |
| 3. | Etudes Approfondies : Papillotement de la lumière et axes de perception visuelle | 140 |
| 4. | Méthode d'optimisation | 143 |
| 5. | Papillotement de la lumière et couleur de l'environnement : utilisation de la méthode d'optimisation | 147 |
| 6. | Papillotement de la lumière et axes de perception visuelle : utilisation de la méthode d'optimisation | 157 |
| 7. | Brillance ressentie et économies d'énergie | 165 |

| | | |
|------|--|-----|
| III. | ETUDE D'UNE APPLICATION DU PAPILLOTEMENT DE LA LUMIÈRE : ECLAIRAGE DE MUSEE ... | 179 |
| 1. | Problématique et paramètres initiaux..... | 179 |
| 2. | Protocole expérimental | 181 |
| 3. | Résultats sur la régulation de puissance..... | 182 |
| 4. | Résultat du vieillissement des LEDs..... | 183 |
| 5. | Résultats colorimétriques des échantillons..... | 185 |
| 6. | Conclusion..... | 187 |
| | CONCLUSION..... | 189 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 191 |
| | TABLE DES ILLUSTRATIONS | 199 |
| | GLOSSAIRE..... | 207 |
| | ANNEXES | 213 |
| | ANNEXE 1 Les voies optiques..... | 214 |
| 1. | Répartition des voies optiques | 214 |
| 2. | Voie rétino-géniculo-striée ou voie visuelle primaire..... | 215 |
| 3. | Voie mésencéphalique..... | 217 |
| 4. | 3ème Voie et hypothalamus..... | 218 |
| | ANNEXE 2 Le système nerveux lié à la vision..... | 219 |
| | ANNEXE 3 Interaction de la lumière visible dans l'œil humain en fonction de l'âge | 222 |
| | ANNEXE 4 Contrastes spatiaux de luminance ou contrastes de luminances de Weber-Fechner C_w . | 224 |
| 1. | Coefficient de réflexion d'une surface p surface | 224 |
| 2. | Coefficient de réflexion diffus d'une surface p_d | 224 |
| 3. | Coefficient de réflexion spéculaire d'une surface, ici un écran p_s écran | 225 |
| 4. | Contraste SANS luminance propre d'une tâche visuelle SANS réflexion spéculaire | 225 |
| 5. | Contraste AVEC luminance propre d'une tâche visuelle SANS réflexion spéculaire | 226 |
| 6. | Contraste SANS luminance propre d'une tâche visuelle AVEC réflexion spéculaire : | 226 |
| 7. | Contraste AVEC luminance propre d'une tâche visuelle AVEC réflexion spéculaire | 227 |
| | ANNEXE 5 Cycle de réactions biochimiques induites par photo-isomérisation | 229 |
| | ANNEXE 6 Outils d'optique pour modélisation de l'œil humain | 230 |
| | ANNEXE 7 Impact de l'âge sur le temps d'adaptation à l'obscurité | 243 |
| | ANNEXE 8 Troubles visuels | 245 |
| 1. | Définition de termes médicaux..... | 245 |

| | |
|---|-----|
| 2. Déficiences visuelles | 247 |
| 3. Maladies oculaires | 253 |
| ANNEXE 9 Epilepsie photosensible | 256 |
| 1. Descriptif..... | 256 |
| 2. Fréquence de vibration et crises épileptiques photosensibles..... | 256 |
| 3. Facteurs influant sur la réponse à un signal vibratoire régulier | 257 |
| 4. Sources et épilepsie | 258 |
| 5. La TV, les jeux vidéo et le papillotement de la lumière | 258 |
| 6. Effet Pikachu | 258 |
| ANNEXE 10 Effets du papillotement de lumière..... | 259 |
| ANNEXE 11 Questionnaire | 261 |
| ANNEXE 12 Eclairage et température de couleur : Kruthoff..... | 263 |

INTRODUCTION

A l'heure actuelle, et dans notre société consumériste, l'Homme est demandeur d'une certaine qualité de vie. Ainsi, nous constatons un perpétuel besoin d'accéder au confort, ce qui se traduit par des exigences de plus en plus nombreuses, tant dans le domaine de l'éclairage, que de la thermique, de l'acoustique, de la qualité de l'air, etc. Cependant, bien souvent ces exigences ne riment pas avec des économies d'énergie. La conception de systèmes d'éclairage hautement efficaces permet de réduire la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. En France, les lois Grenelle I et Grenelle II insistent sur la maîtrise de l'éclairage. Deux grandes tendances semblent se dessiner : les Hommes conscients des problèmes environnementaux et qui tentent de mieux gérer l'énergie, et les Hommes, qui, inconsciemment, ou non, ne pensent égoïstement qu'à leur bulle de confort quels que soient les impacts qui en découlent, du moment qu'ils sont satisfaits. Comprenant cet effet sociologique, il est important de réfléchir aux technologies et leur interaction avec l'environnement.

Dans ce sujet de recherche, nous allons nous intéresser plus particulièrement à l'étude du confort visuel de l'être humain. Ceci passe donc par sa perception visuelle de l'environnement et de la lumière. De façon plus exacte, le sujet s'attachera à la perception visuelle du papillotement de la lumière. L'objectif étant d'« éclairer juste » et intelligemment, il est important de mieux connaître les effets et limites perceptives de la lumière vibrante, pour envisager de l'utiliser, d'évaluer le confort, et de faire des économies d'énergie. Ainsi, ce travail constituera une aide à la conception lumière en fonction de l'utilisation.

Dans le premier chapitre, les éléments fondamentaux sur la physique de la lumière naturelle et artificielle seront rappelés via des notions de photométrie et de colorimétrie. L'approche sociologique que nous détaillerons révélera une utilisation excessive de la lumière, mais également une difficulté de l'humain à s'adapter et à choisir les nouvelles technologies d'éclairage. L'utilisation accrue de sources artificielles fait apparaître, en plus des exigences techniques et normatives, de nouvelles exigences par les utilisateurs, qui sont principalement des notions autour du confort. Mais ce terme « confort » est-il bien employé ? Car en effet, il est très souvent utilisé de façon générale dans de nombreux domaines et contextes, pour « un peu tout et n'importe quoi ». Aussi, notre premier axe de travail consistera à développer une réflexion physico-psycho-cognitive autour des notions de « confort », « bien-être » et « qualité de vie », qui sont les termes clés de notre sujet d'étude. Et, afin de rester sur la thématique « lumière et vision », nous définirons ces nouvelles bases en axant notre réflexion sur les mécanismes de psychologie cognitive mis en relation directe avec les mécanismes de perception visuelle. Ceci étant réalisé, une classification d'autres termes (tels la « sécurité », la « productivité », etc.) par domaines d'application sera possible.

Dans le second chapitre, l'accent sera porté sur les caractéristiques physiologiques de l'œil humain et ses mécanismes perceptifs. La perception de notre environnement n'est pas stationnaire. Elle nécessite des composantes à la fois spatiales et temporelles qu'il convient de comprendre pour nos expérimentations. Les mécanismes sont interconnectés, cependant nous avons choisi de distinguer la perception d'objet, du relief, de la lumière, de la couleur, et du mouvement. Nous nous intéresserons principalement à la vision emmétrope, toutefois une approche de l'impact de l'âge,

des déficiences visuelles et pathologies pouvant affecter la perception visuelle de notre environnement ne sera pas écartée (ces éléments constituant des études préliminaires à de futures investigations). Enfin, il convient de préciser que la lumière a des effets non visuels dont nous ne parlerons que succinctement dans ce chapitre puisque cela nous éloignerait trop de notre thématique initiale.

Dans le troisième chapitre nous traiterons de la lumière et de la sensibilité visuelle. Nous avons pu remarquer que pour les êtres humains, il est bien plus souvent facile de parler d'éléments inconfortables que confortables. Aussi, nous nous intéresserons aux causes d'inconforts et gênes visuelles. Les phénomènes d'éblouissement et de papillotement de la lumière seront principalement détaillés. Concernant l'inconfort par éblouissement, les caractéristiques sont spatiales, quantifiables et peuvent atteindre des degrés d'impact différents. L'inconfort par papillotement de lumière est quant à lui lié à des contrastes temporels de luminance ou chromatique de la lumière. Comme nos études expérimentales s'appuient sur ce phénomène, nous ferons des rappels empiriques qui montreront que la thématique est complexe et interroge depuis de nombreuses années. Enfin, nous présenterons les pathologies pouvant être induites par la perception directe de lumière naturelle ou artificielle. Nous retiendrons particulièrement que le papillotement de lumière, présent sur toute installation électrique peut être perçu de façon consciente ou inconsciente et peut avoir un impact sanitaire allant d'un simple mal de tête à des crises d'épilepsies photosensibles.

Enfin, dans le quatrième et dernier chapitre, nous présenterons nos expérimentations autour du papillotement de lumière. En effet, malgré des impacts sanitaires non négligeables, nous sommes convaincus qu'une utilisation intelligente du flickering pourrait permettre des économies d'énergie et engendrer une autre manière de s'éclairer. Mais comment pouvons nous y parvenir ? Dans l'objectif de mieux comprendre ce phénomène et limiter ses impacts sanitaires, nous réaliserons des expérimentations sur le ressenti humain. A l'aide de diodes électroluminescentes et un signal variable en fréquence et rapport cyclique nous créerons un stimulus lumineux indirect et surfacique, puis le soumettrons à observation. Nous considérerons divers environnements colorés et diverses orientations visuelles (fovéale et périphérique). L'œil emmétrope sera principalement étudié pour une tranche d'âge de 20 à 39 ans, cependant une première approche comparative des résultats pour amétropies avec et sans correction optique sera également amorcée. Mais comment analyserons-nous les multiples données de ces études phénoménologiques ? Comment en déduire des paramètres physiques de vibration de lumière optimaux et confortables pour un observateur ? C'est ce que nous expliquerons en présentant une méthode récente d'analyse statistique, que nous utiliserons pour définir des couples de paramètres physiques [fréquence ; rapport cyclique] optimaux et psychophysiologiquement confortables à très confortables. Cependant, cela ne suffit pas pour répondre à la problématique. Des économies d'énergie sont-elles envisageables ? C'est effectivement ce que nous chercherons à montrer en considérant l'effet Broca Sulzer qui traite de la brillance ressentie, par opposition à la brillance réelle (ou luminance). Enfin, afin d'illustrer nos études phénoménologiques, nous présenterons une étude applicative et concrète du papillotement de lumière dans le contexte de l'éclairage des musées. Nous comparerons la dégradation colorimétrique de deux échantillons de tissus normalisés placés sous une lumière vibrante et sous une lumière continue. Nous aborderons également l'aspect énergétique.

CHAPITRE 1

LUMIERE ET CONFORT VISUEL :
Dimension énergétique et sociale, réflexion
cognitive autour des notions de confort.

INTRODUCTION

De nos jours, et ceci depuis le XIX^e siècle, l'Homme vit avec la lumière naturelle et la lumière artificielle tant en éclairage intérieur qu'en éclairage public.

Ce mode de vie induit de nombreuses questions. Comment l'Homme vit-il cette révolution de la lumière? Sa vision parvient-elle à s'adapter aux différentes conditions d'éclairage ? La vision de jour et celle de nuit diffèrent-elles ? Toutes les sources de lumière se valent-elles ? Quel est l'impact social ? Quelles exigences l'utilisation des sources artificielles suscite-t-elle ? Autant de questions pour lesquelles nous apporterons des éléments de réponses dans ce chapitre.

En effet, dans un premier temps, nous rappellerons les éléments fondamentaux sur la physique de la lumière.

Nous sommes actuellement dans un contexte politique de Transition Energétique qui prend des dimensions à la fois individuelles, technologiques et réglementaires. Ainsi nous aborderons l'approche sociologique en mettant en opposition la société consumériste et la maîtrise de la demande d'énergie. Nous en déduisons la difficulté de l'utilisateur face aux technologies modernes et complexes de l'éclairage : là où l'être humain tendrait vers une utilisation accrue et excessive de lumière artificielle les nécessités énergétiques actuelles incitent à une limitation. Il convient donc d'agir sur les comportements et sur les modes de pensée. Cela ne peut se faire que par une communication et une pédagogie efficace qui rendent la technologie compréhensible par les non-initiés (adaptation comportementale et/ou technologique).

La complexité des technologies actuelles impose la création d'un cadre normatif strict tandis que les utilisateurs finaux sont à la recherche d'un confort maximal. Aujourd'hui, dans la plupart des cas les normes qui régissent les sources de lumière font abstraction de cette notion de confort. Il est donc indispensable de définir cette notion « fourre-tout ».

Ensuite, nous nous attacherons à définir de nouvelles bases, en axant notre réflexion sur les mécanismes de psychologie cognitive mis en relation directe avec les mécanismes de perception visuelle. Nous aboutirons ainsi sur des domaines de classification qui nous permettront de mieux appréhender les termes « confort visuel », « bien-être », « qualité de vie », « sécurité », « productivité »... en conservant notre approche sur la lumière et la vision.

I- LA LUMIERE

1. La lumière visible et invisible

« La lumière est émise par la matière et se manifeste par son action sur la matière. » « Elle peut être reçue directement par l'œil ou par un autre récepteur qui l'absorbe, au moins partiellement, en étant le siège d'un échauffement, d'un déplacement d'électrons, d'une réaction chimique ou d'une ré-émission de lumière. » (1)

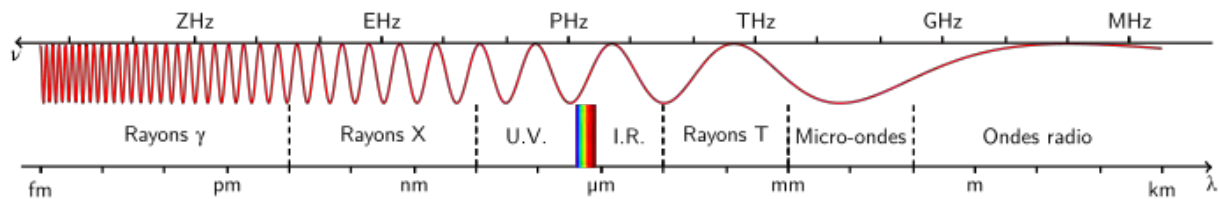


Figure 1 Spectre électromagnétique

Les longueurs d'ondes comprises entre 380 nm (violet foncé) et 780 nm (rouge) sont dites visibles car impressionnent notre œil ce qui se traduit par sensation visuelle des couleurs. L'additivité des couleurs du visible, ou radiations colorées, recrée une lumière blanche. Nous reviendrons par la suite sur ce mécanisme dans le chapitre II.

En 1872, Maxwell montra que tout rayonnement monochromatique visible ou invisible est un phénomène vibratoire lié à la propagation d'un champ électromagnétique, soit la composition d'un champ électrique et magnétique.

Lorsque nous décomposons la lumière, avec un prisme par exemple, nous obtenons un spectre continu, qui met en évidence une suite de longueurs d'ondes du spectre du visible.

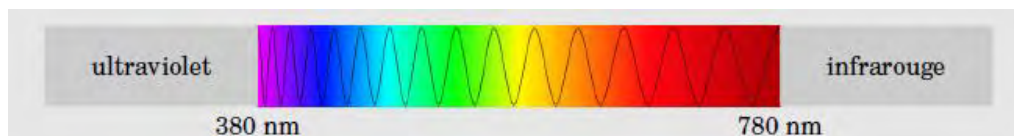


Figure 2 Spectre du visible entre 380 nm et 780 nm (2)

La lumière, comme tout rayonnement électromagnétique, transporte donc de l'énergie E . Cette énergie E d'une particule de lumière, nommée photon, est proportionnelle à sa fréquence ν multipliée par la constante de Planck. Ainsi, des photons avec une petite fréquence ou à grande longueur d'onde, ont une petite énergie et inversement.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \text{ avec } \lambda = \frac{c}{\nu}$$

E : énergie transportée par la lumière

λ : longueur d'onde en nm

c : célérité de la lumière

h : constante de Planck $\approx 6,626\ 068\ 96 \times 10^{-34}$ J.s

ν : fréquence

Remarque : dans le vide la célérité a la même valeur pour toutes les ondes électromagnétiques
 $c = 2,98. 10^8$ m/s

Voici ci-dessous le spectre électromagnétique de la lumière du soleil aussi nommée lumière naturelle. Il s'agit d'un spectre continu.

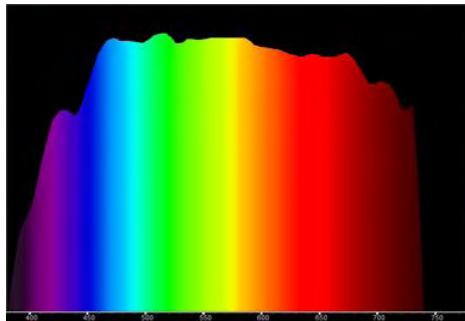


Figure 3 Spectre de la lumière du jour (3)

Il faut savoir que cette lumière est idéale pour notre vision, aussi, les sources artificielles auront toujours tendance à vouloir se rapprocher de la lumière du soleil. Cependant, de part leurs constitutions pour générer la lumière, cela sera difficilement le cas, et leurs spectres d'émission ne seront pas toujours continus.

2. Grandeurs photométriques et radiométriques

La radiométrie définit des grandeurs énergétiques dans le domaine des rayonnements électromagnétiques, alors que la photométrie, elle, ne prend en compte que l'effet visuel de la lumière. Nous parlerons ainsi des flux énergétiques et flux lumineux.

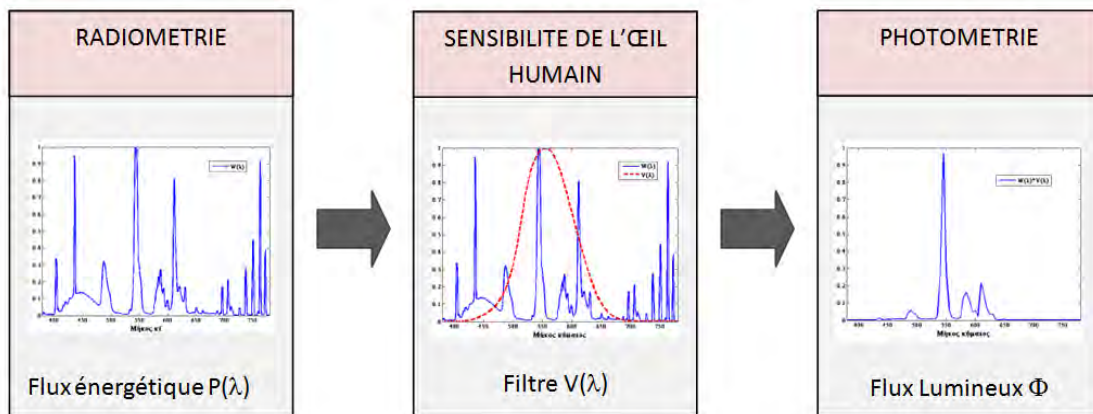


Figure 4 Passage d'un flux énergétique à un flux lumineux - Schéma réalisé à partir d'un exemple de M. Topalis. (4)

La formule mathématique permettant de déterminer le flux lumineux à partir du flux énergétique est :

$$\Phi = Km \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Φ : flux lumineux en lumen (lm)

P(λ) : flux énergétique en Watt par unité de longueur d'onde (W/nm)

V(λ) : sensibilité spectrale de l'œil humain

Km : constante = 683 lm/W

Les bornes intégratrices étant la plage de longueurs d'ondes du visible (nm)

Le tableau ci-dessous présente les grandeurs et unités fondamentales de l'énergétique/ radiométrie et de la photométrie.

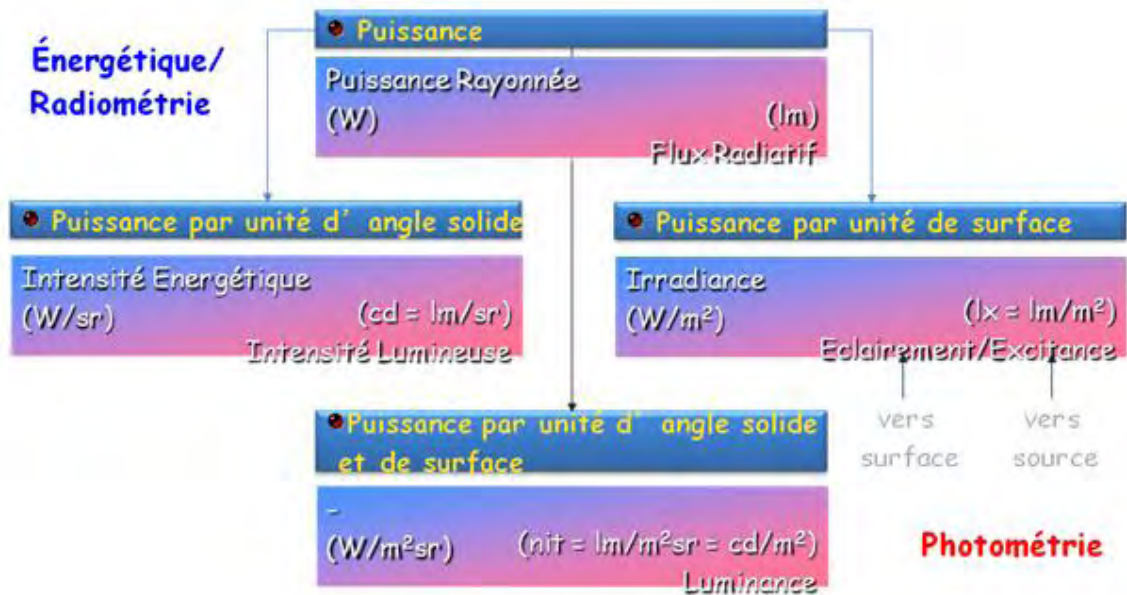


Figure 5 Comparaison entre les grandeurs radiométriques et les grandeurs photométriques (5)

Remarque : Les termes spécifiques à la lumière tels la luminance, l'éclairement, l'IRC, la température de couleur sont définis dans le glossaire (p207 à 212).

3. Génération de la lumière artificielle

Les sources de lumière artificielle utilisent toujours un des deux procédés suivants : l'incandescence ou la luminescence.

Pour les sources incandescentes, un filament est chauffé ce qui émet un rayonnement. Le spectre émis est continu, tout comme le spectre solaire mais la température de couleur obtenue est bien plus faible.

Pour les sources luminescentes, le principe est différent et nous distinguons :

- les lampes à décharge pour lesquelles un gaz est excité via une décharge électrique ce qui va provoquer l'émission d'un rayonnement lumineux.
- Les Diodes Electro-Luminescentes (LED) pour lesquelles un semi-conducteur va émettre de la lumière par recombinaison des porteurs.

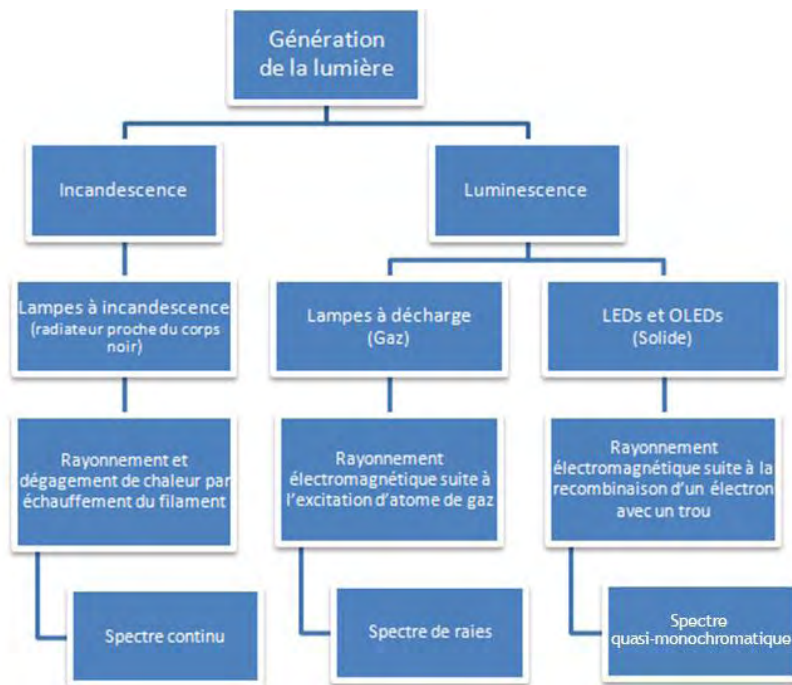


Figure 6 Schéma détaillant les différents types de génération de la lumière (5)

4. Approche sociologique de la lumière

a. Utilisation de l'éclairage : un symbole et des habitudes sociales.

L'acte d'éclairer un espace ou de s'éclairer ne consiste pas seulement en l'utilisation d'un interrupteur. Il s'agit en fait d'un symbole qui est enraciné dans notre culture occidentale, car issu d'habitudes et de dispositions sociales.

En effet, l'utilisation de l'éclairage artificiel a marqué notre temps. Auparavant seule la bougie permettait de rallonger les journées permettant des activités et le travail lorsque la nuit était tombée. Mais, depuis l'apparition des premières sources de « lumière artificielles », c'est l'économie entière, et un nouveau mode de vie et d'habitudes sociétales qui se sont mis en place. Un savoir et un apprentissage de l'électricité a permis à la société d'accepter et d'ancrer cette technologie dans la vie courante et les espaces habités.

De plus, l'éclairage artificiel s'accompagne d'une multifonctionnalité. Il est devenu indispensable, pratique et facile d'utilisation. Il permet une mise en valeur, apporte de la sécurité et une certaine qualité de vie.

La technologie habite ainsi petit à petit les modes de pensées et les gestes quotidiens. C'est ce que GRAS nomme la technisation ou technolisation (6 p. 61).

b. L'individu dans un monde consumériste.

L'individu se caractérise par sa subjectivité, sa culture. Il sera par exemple plus sensible à une esthétique qu'à l'efficacité technologique. Il aura tendance à multiplier les « accessoires » (luminaires, sources de lumière, produits dérivés).

Les consommateurs sont bien souvent prisonniers d'un système dit sociotechnique où presque tout est rattaché à l'utilisation de l'électricité et où une dépendance aux appareils technoscientifiques règne. L'Homme cherche avant tout ses intérêts privés et sa satisfaction personnelle, ce qui donne une dimension immatérielle à la consommation. Ses comportements d'achats sont très variables (ordinaires, frugaux ou bien excessifs) et grandement influencés par le marketing ce qui l'empêche notamment de réfléchir sur ses choix et son impact énergétique.

Les coûts additionnels liés à la technologie induisent des distinctions sociales via le regard de l'autre et le paraître. Ce mode de consommation ne va malheureusement pas de pair avec la Maîtrise de Demande d'Énergie. D'ailleurs, lorsque nous nous intéressons plus en détail aux consommations électriques pour l'éclairage en France, nous pouvons nous apercevoir que la part résidentielle représente à elle seule près de 20% ce qui n'est pas négligeable. Les comportements doivent changer et nécessiteront des efforts.

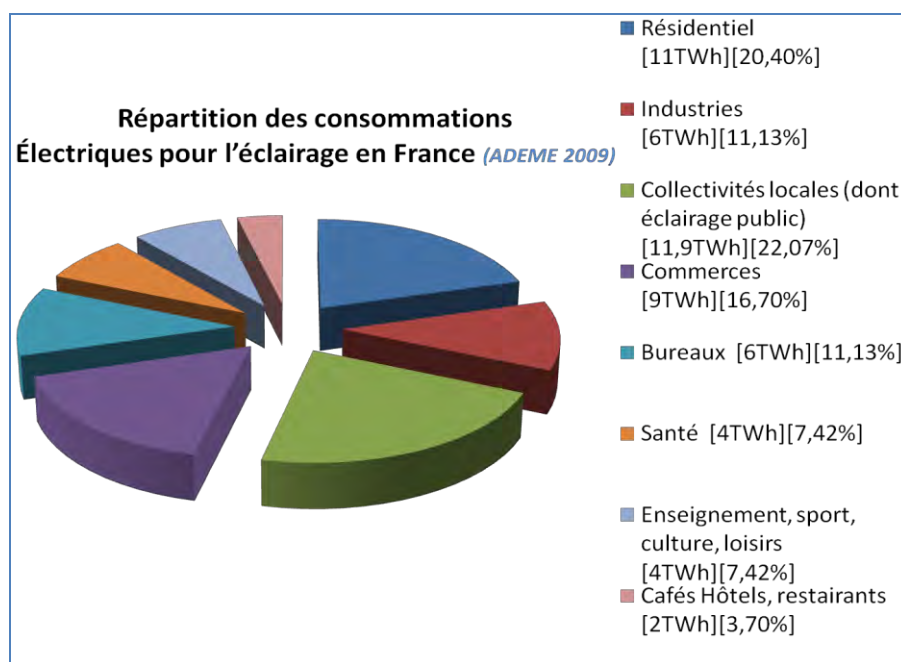


Figure 7 Répartition des consommations électriques pour l'éclairage en France (données de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME 2009))

c. La Maîtrise de la Demande en Energie : infléchir un monde consumériste ?

Le contexte politique actuel demande à la société de changer ses comportements et de consommer différemment. Mais la Maîtrise de Demande d'Energie (MDE) n'est pas si simple à mettre en place. Elle commence actuellement par une action sur la communication et la mise en place d'étiquetages européens clairs.

Il est difficile d'infléchir les usages. La connaissance en physique des fonctionnements des appareils électriques pourrait simplifier la compréhension de l'enjeu énergétique. Mais il n'est pas évident de modifier sa manière de s'éclairer, ou de penser différemment la gestion de son éclairage. Le mode consumériste est devenu un réflexe (6 p. 61).

Nous avons vite observé une opposition d'attitude face à la MDE. En effet, l'accès à l'électricité est devenu tellement simple et évident que limiter sa consommation amène à un sentiment de régression.

La MDE vient rompre les habitudes et cela semble être en contradiction avec les signes liés à l'évolution et au progrès.

Par ailleurs, comme l'individu associe aux objets des fonctions symboliques, il a peur, en modifiant ses habitudes de perdre en « confort », et son paraître social. Car rappelons-le, la lumière est devenu un signe extérieur de richesse. Et en effet, l'éclairage a pris une part importante dans l'habitat tant il est associé à une reconnaissance sociale. L'éclairage n'est plus seulement utilitaire (confort visuel) mais il permet également de mettre en scène et de marquer l'identité de son « chez-soi » par le confort, l'accueil, et l'ambiance par exemple chaleureuse. La dimension décorative n'est pas moindre et le budget accordé pour les luminaires est important. « Ainsi, on n'éclaire pas pour voir, mais pour être vu entre soi » ce qui est défini par de « l'ex-timité » (6 p. 48).

Voici les principales facettes auxquelles doit répondre l'éclairage pour satisfaire les besoins des individus :

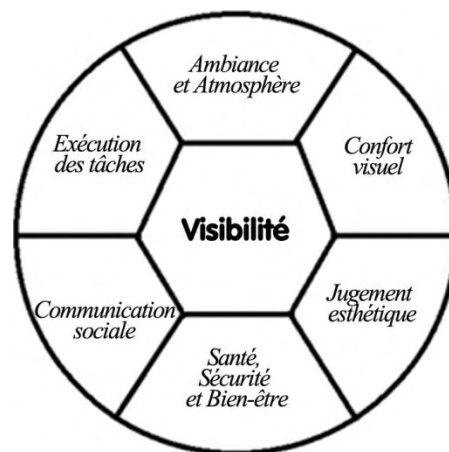


Figure 8 Besoins humains, par Marc Fontoyront de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) (7)

La quantité de points lumineux dans une habitation est en augmentation. Elle dépend de la taille et du type de logement, mais aussi du statut d'occupation de l'habitat, l'âge du chef de ménage...

Mais la MDE rappelle les fonctions utiles de l'éclairage et fait émerger un sentiment de culpabilité face à des consommations futiles. Maîtriser son énergie a tout d'abord eu tendance à être dévalorisant. Cela renvoyait au terme « écolo » ou bien était synonyme de « pauvreté ». Cependant, actuellement, via le nombre de campagnes accompagnant cette démarche, un autre mode de pensée commence à se mettre en place où il est devenu valorisant et chic de maîtriser sa consommation.

Aussi, afin de répondre aux attentes des Humains mais également aux enjeux économiques et architecturaux, un éclairagiste devra faire des compromis et prendre en considération les éléments du graphique Figure 9, dont l'intersection des 3 catégories permettra aux individus d'accéder à une qualité d'éclairage optimale :

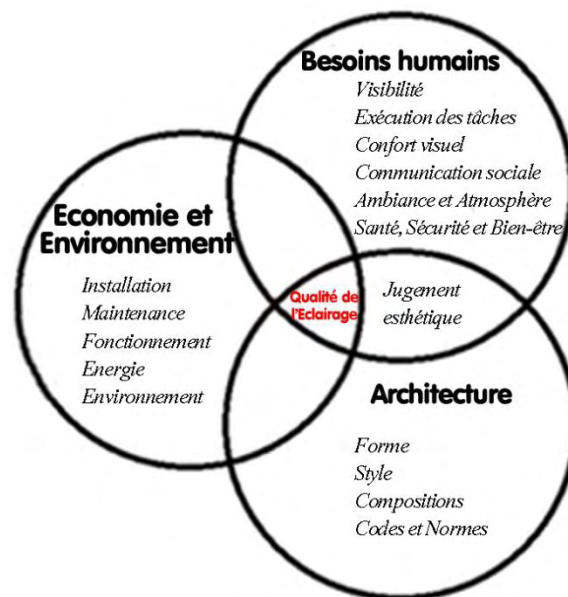


Figure 9 Qualité de l'éclairage (7)

Remarque : dans le but de satisfaire les exigences, il est nécessaire de savoir choisir ses sources de lumières, que se soit en éclairage intérieur qu'en éclairage extérieur.

d. Des caractéristiques techniques complexes à décrypter

L'éclairage artificiel est un pôle qui offre de nombreuses caractéristiques techniques. Difficile de s'y reconnaître pour des personnes non avisées face à la multitude de sources et leurs caractéristiques techniques : différents culots, et différents diamètres, verre opaque, transparent ou dépoli, multiples formes des sources, etc. température de couleur, durée de vie, puissance et équivalence des puissances entre lampes à incandescence et lampes fluo compactes, etc.

Mais cette barrière technique n'est pas la seule. Citons par exemple le fait que les sources à incandescence ont progressivement été interdites à la vente. Un sentiment d'incompréhension face au changement de sources se manifeste : « Pourquoi envisager de changer des sources de lumière quand elles paraissent tout à fait satisfaisantes ? » (6 p. 60).

Des questions sur les nouvelles technologies tels les LBC (lampes basse consommation) et les LED apparaissent. Les utilisateurs n'ont pas confiance et ne sont pas convaincus par ces nouvelles technologies. En effet, l'utilisation de nouvelles sources n'est pas simple et demande de s'y pencher longuement. Il ne suffit pas de remplacer toutes les sources incandescentes par des LBC ou des LEDs pour un résultat optimal. La profusion d'informations, et leur manque de lisibilité entraîne une confusion chez l'acheteur. Auparavant, il considérait les sources de lumière comme un outil ordinaire mais récemment, avec ces nouvelles technologies à caractéristiques techniques bien définies, cela crée en eux un tel casse-tête que cet objet en devient complexe.

Concernant le cas des LBC par exemple, seuls les usagers convaincus par le produit s'en équipaient, et ces personnes restaient marginales. Actuellement, il n'est pas si simple de « croire en la technologie et de prendre le risque de s'en équiper » (6 p. 46).

II- REFLEXION SUR LES NOTIONS LIEES AU CONFORT – CAS DU CONFORT VISUEL

1. Le confort

Dans la physique de l'habitat, il est indéniable que le « confort » est rattaché à l'interaction de divers domaines techniques.

La Figure 10 illustre ces liens, et met en exergue les différents domaines de confort associés.

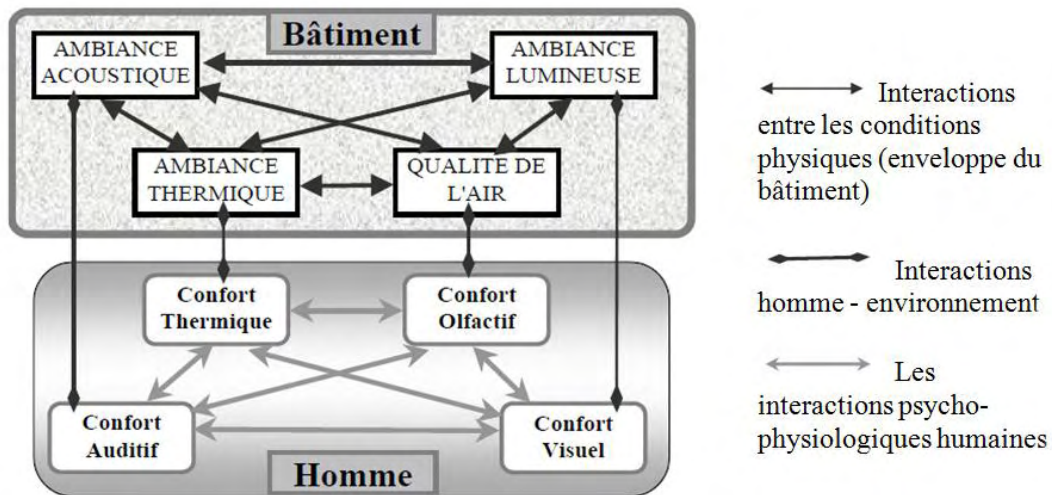


Figure 10 Les interactions entre les divers domaines du confort sont de plusieurs types (8)

Nous allons centrer notre étude dans ce document sur le confort visuel afin d'établir les définitions des termes principaux (nous ne nous intéresserons pas aux multiples interactions, le sujet étant trop vaste et éloigné de la problématique initiale de ce sujet de recherche).

La notion de confort est, en notre sens, à associer à des grandeurs physiques, quantifiables et mesurables, même si bien souvent « les mots confort et inconfort sont utilisés comme termes génériques » (8 p. 7).

Ainsi, lorsque nous abordons la notion de confort visuel, nous ne considérons pas les interprétations cognitives issues de la perception du stimulus visuel de l'environnement. Nous ne considérons donc que les éléments initiaux à l'interprétation. La situation de confort visuel correspond ainsi à un état initial qui est à mettre en lien direct avec le confort lumineux et la sensibilité visuelle liée à la physiologie de l'œil (variable suivant les individus). Le confort lumineux comprend les informations sur l'environnement qui sont des éléments physiques mesurables du stimulus lumière (paramètres photométriques et colorimétriques).

2. Le bien-être

Afin d'aborder la notion de bien-être, nous devons tout d'abord nous intéresser à l'évaluation cognitive, et à l'importance des émotions reconnues par la psychologie scientifique moderne.

Les mécanismes émotionnels sont maintenant bien connus des cognitivistes. Ils sont présentés dans les théories de l'"appraisal" (ou évaluation cognitive) qui « conceptualisent l'émotion comme un processus continu d'évaluation » ou dit autrement comme un phénomène multi-componentiel. Ce statut privilégié de l'émotion dans l'esprit humain révèle que l'émotion est au cœur de la cognition » (9).

En effet, selon les travaux de Magda B. Arnold, psychologue américaine (1903-2002) reconnue pour ses études pionnières des approches cognitives modernes sur l'émotion, l'évaluation cognitive est très rapide, automatique et inconsciente. Elle est issue de l'évaluation de stimuli perçus.

Ainsi, selon les théories de l'"appraisal", aussi dites théories de l'évaluation cognitive, une émotion est le résultat d'une évaluation cognitive provoquée par un événement ou situation, interne ou externe.

La plupart des processus cognitifs sont :

- Soit nécessaires à l'émotion en tant que telle (déclenchement ou suppression de l'émotion) ;
- Soit influencés par l'émotion (la perception, l'attention, la mémoire, le jugement moral, la prise de décision) ;
- Soit encore impliqués dans la modulation de l'émotion (la réévaluation ou la suppression) (9).

Ces théories impliquent donc que pour comprendre l'émotion suscitée, il faut également une compréhension en amont de l'évaluation faite par un individu face aux événements de son environnement. Nous comprenons alors que l'émotion est intrinsèque à un individu, ce qui implique qu'elle est totalement subjective.

Klaus Scherer, Professeur émérite à l'Université de Genève, directeur du Centre Inter facultaire en Sciences Affectives et du Centre Suisse en sciences affectives, nous propose un modèle sur les composantes des émotions basé sur des séquences de changements d'état face à un stimulus.

Il précise également dans son ouvrage « qu'il est suggéré de réserver le terme 'émotion' uniquement à cette période durant laquelle plusieurs sous-systèmes de l'organisme sont couplés ou synchronisés afin de produire une réaction adaptée à un événement considéré comme essentiel pour le bien-être de l'individu ». (9)

Ceci signifie donc que nous pouvons associer le bien-être à une phase du traitement de l'émotion. En effet, comme l'indique le Docteur en psychologie Laetitia Pirrello Parnot lors de notre entretien, « nous pouvons, par exemple, obtenir un certain niveau de bien-être si l'émotion est bien gérée. L'événement causant l'émotion peut aussi venir perturber une période de bien-être, qui sera alors antérieure à l'événement. Nous avons ainsi un continuum qui peut aller d'un état de mal-être à un état de bien-être. La gestion de l'émotion, et donc la réponse à l'événement perturbant (dépendant du contexte, de la personnalité, de l'habitude à gérer ce type de situation, etc.), va influencer sur cet état. »

M. Scherer a constaté que ces changements d'état agissent de manière synchronisée et interdépendante sur 5 systèmes identifiables :

- le processus d'appraisal ou d'évaluation cognitive (activité du système nerveux central) ;
- la physiologie périphérique ou psychophysiologie (réponses périphériques) : combinaison de fonctions mentales et de la perception sensorielle des organes ;
- la tendance à l'action ou motivationnelle (tendance à répondre à l'événement) ;
- l'expression motrice (mouvement, expression faciale, vocalisation) ;
- le sentiment subjectif.

La Figure 11 suivante illustre la complexité du mécanisme :

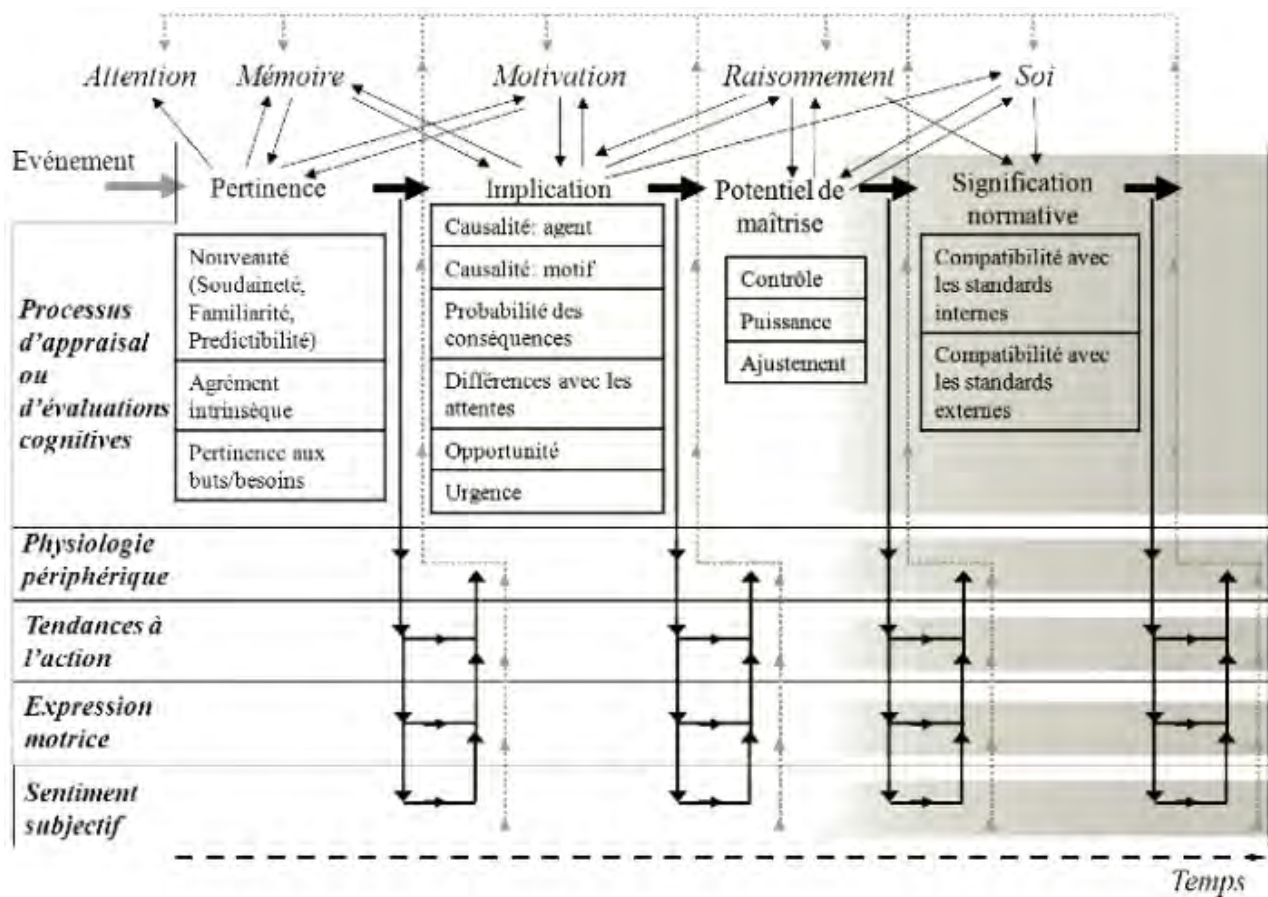


Figure 11 : Modèle des composantes de Scherer et de ses interactions avec d'autres systèmes fonctionnels tels que l'attention, la mémoire, la motivation, le raisonnement et le soi (10)

Ce tableau nécessite de s'intéresser un peu plus aux termes employés :

➤ **EMOTION**

« Le concept des émotions est multidimensionnel. Il se structure, généralement, autour de quatre dimensions qui sont les suivantes :

- état physique (capacités physiques) ;
- état psychologique (douleurs) ;
- sensations somatiques (anxiété) ;
- statut social (rapport à l'environnement professionnel).

Le concept reste très subjectif dans la mesure où il correspond à la perception qu'a l'individu de ce qui l'entoure, de « sa relation avec les spécificités de son environnement » précise le Docteur en psychologie Laetitia Pirrello Parnot lors de notre entretien.

Plusieurs facteurs, propres à chaque individu, vont impacter sur le traitement des émotions, tels les normes, les valeurs, les croyances, les attentes, les objectifs et les peurs (définition de l'organisation Mondiale de la Santé (OMS), de 1994).

Les résultats d'émotions sont principalement les expressions et les comportements émotionnels.

➤ **PSYCHOPHYSIOLOGIE et PHYSIOLOGIE PERIPHERIQUE**

La psychophysiologie correspond aux phénomènes périphériques de l'émotion. Il s'agit de « l'étude des relations qui se produisent entre des phénomènes psychologiques et physiologiques, en faisant référence à l'excitation périphérique ou physiologie périphérique. Elle permet de comprendre les relations entre les processus mentaux et corporels qui le sous-tendent (relations corps-cerveau), en rapport avec l'environnement. » (Entretien avec le Docteur en psychologie Laetitia Pirrello Parnot) Elle peut être relative à l'action des stimuli, comme par exemple un stimulus auditif ou même stimulus visuel.

➤ **PSYCHOPHYSIQUE**

La psychophysiologie induit une réponse psychophysique. Par définition, une réponse psychophysique relève d'une étude expérimentale dite méthode psychophysique. La « loi psychophysique » est la formule par laquelle Weber-Fechner pensait pouvoir résumer le résultat de ses expériences : « La sensation varie comme le logarithme de l'excitation » (11).

➤ **SENSATION**

Il convient de rappeler qu'une émotion est différente d'une sensation. La sensation est directement associée à la perception sensorielle, qui est une conséquence physique directe.

➤ **PSYCHOSENSORIEL**

Le domaine psychosensoriel a trait à la fois aux facultés intellectuelles et aux perceptions sensorielles. Il s'agit d'une sous catégorie de la psychophysique.

Suite à ces définitions, nous pouvons mieux appréhender notre étude sur le bien-être visuel. En effet, dans le cas précis de notre étude sur la vision, c'est le processus « physiologie périphérique » du système émotionnel de Klaus Scherer qui est le processus dominant dans le traitement des

émotions cognitives suscitées par un stimulus visuel. Le bien-être visuel est issu de l'interprétation cérébrale de signaux lumineux physiques reçus par l'organe visuel. C'est donc une réponse psychophysique liée à un organe sensoriel, soit une réponse psychosensorielle.

3. Qualité de vie

En s'appuyant sur notre analyse précédente, la qualité de vie va résulter de paramètres de confort et d'une sensation de bien-être. Il s'agit de l'état dans lequel se trouve l'individu suite au processus d'évaluation émotionnel cognitif. C'est l'état final qui sera induit par le jugement sensoriel porté par un individu sur la perception de son environnement : perceptif / évaluatif / préférentiel.

Il s'agit donc d'expressions et comportements émotionnels. Dans le cas particulier de la vision, il s'agit de la qualité visuelle qui résulte d'une réaction adaptée à l'environnement visuel.

4. Notions d'ambiance, productivité, sécurité

Les notions d'ambiance, de productivité et de sécurité associées à la lumière demandent à être mieux définies, afin de mieux en comprendre les tenants et les aboutissants. Chacun de ces concepts ne se situe pas aux mêmes niveaux selon qu'ils appartiennent à trois classes distinctes :

- confort lié directement à des paramètres physiques ;
- évaluation cognitive avec approche psychosensorielle ;
- expression ou comportement émotionnel.

➤ **ATMOSPHERE & AMBIANCE**

Une ambiance est subjective et correspond en ce sens à un ressenti propre à l'individu. Elle est issue d'un contrôle d'atmosphères et est donc entièrement liée à un contrôle de paramètres physiques et à notre système visuel.

Une ambiance se définit aussi par sa pluridisciplinarité : éclairage, thermique, acoustique, etc. Ce sont donc des paramètres physiques qui vont se heurter à la sensibilité de l'individu. Lorsque ces paramètres seront associés de manière étudiée et précise, différentes ambiances émergeront.

A titre d'exemple, nous avons travaillé sur le projet « art & science » intitulé « L'Écorce du vent » en collaboration avec le duo d'artiste Pascal & Aurélie Baltazar, Lauréats du prix A.R.T.S. 2010.

Le projet consistait à expérimenter dans un environnement « lumineux contrôlé », le ressenti et les émotions d'un panel d'observateurs non initiés (une centaine de participants). Pour cela, nous avons fait varier des paramètres photométriques et colorimétriques pour créer divers stimuli visuels. Chaque environnement lumineux/scenario (paramètres d'atmosphère) a été caractérisé avant d'être proposé à évaluation (relevés de mesures physiques). Afin de recueillir les ressentis et

expression émotionnelle des observateurs, des questionnaires d'évaluation visuelle leur ont été distribués, puis analysés.

Cette expérience à grande échelle nous a permis de mettre en évidence qu'un contrôle de paramètre physique a une influence directe sur le ressenti puis sur l'expression émotionnelle.

➤ **PRODUCTIVITE**

La productivité est le résultat d'un contrôle de paramètres physiques couplé à une approche psychosensorielle d'un individu.

Notons que la lumière peut produire des effets visuels et non visuels. En effet, il a été montré l'action de la lumière sur l'organisme via un troisième photorécepteur nommé ipRGC. Il est responsable de la production de mélatonine (hormone du sommeil/éveil), qui impacte sur notre performance et donc notre productivité.

➤ **SECURITE**

L'aspect sécuritaire, ou sensation de sécurité d'un lieu par exemple, est issue de paramètres physiques, physiologiques et psychosensoriels.

Prenons l'exemple de l'éclairage public, où, si les paramètres d'atmosphère sont mal contrôlés, la performance visuelle va diminuer, et un sentiment d'insécurité va croître. L'émotion induite sera principalement de la peur. Aussi, cette émotion agira sur le comportement, et un état de vigilance visuelle va se mettre en place, ainsi que du stress accru, de la fatigue, voire même l'action de fuite.

➤ **COMPORTEMENT CONTRE-INTUITIF**

Un comportement émotionnel peut s'avérer parfois troublant car en total désaccord avec des paramètres physiques que nous jugeons plus adaptés à un certain contexte. « Ce résultat contre intuitif pouvant s'expliquer par des éléments du traitement cognitif tels l'histoire de la personne, ses propres expériences passées, etc. » d'après notre entretien avec l'ergonome cognitive Corinne Argenty.

Prenons l'exemple de deux éclairages publics, dans une région du Sud de la France : une source au sodium à température de couleur faible (aspect jaunâtre) et un éclairage à LED à température de couleur plus élevée (aspect blanc bleuté). Il s'est avéré après questionnement des populations vivant dans les régions du Sud de l'Europe, que les personnes préfèrent un éclairage urbain au sodium à température de couleur faible (aspect jaunâtre). Mais il s'agit ici d'un résultat contre intuitif incohérent avec les performances du système visuel de nuit (cf. Effet Purkinje). En réalité, ce type d'éclairage dans une situation de pénombre peut provoquer un inconfort visuel et altérer la perception de notre environnement, voire, nuire à l'aspect sécuritaire du lieu. Dans cet exemple, le traitement cognitif est allé au-delà de la logique de la physique. En effet, les habitants habitués dans ces régions à un climat ensoleillé, ont jugés plus agréable et esthétique les sources à température de couleur chaude ce qui est lié à l'aspect culturel. Le traitement cognitif a fait appel à l'histoire de la personne, ses propres expériences passées, et a abouti à la conclusion que ce type d'éclairage restitue une bonne qualité visuelle et sensation de sécurité. Les interconnexions de Klaus Scherer ont joué un rôle primordial, où la sensation de sécurité et l'expression émotionnelle se retrouvent en contradiction avec les paramètres physiques de confort.

5. Conclusion

Selon le contexte, et donc les lieux et leurs activités, l'impact souhaité sur l'expression ou le comportement sera différent. Par exemple, dans une usine, nous attendons qu'une installation d'éclairage optimise la productivité, alors que chez soi, nous ferons en sorte que l'éclairage soit chaleureux et de ce fait reposant. Certaines situations peuvent cependant nous paraître adéquates, mais procurer l'effet inverse, comme vu dans ce chapitre.

Ainsi pour se retrouver dans une bonne ou mauvaise qualité visuelle de la lumière il convient de considérer de multiples éléments tels que ceux présentés Figure 12.

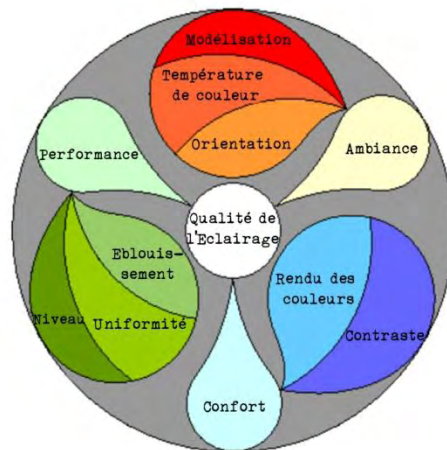


Figure 12 Qualité visuelle de la lumière (7)

Et les trois critères qui définissent la bonne qualité d'une installation d'éclairage sont :

- le confort visuel (paramètres d'ambiance + physiologie) ;
- la sécurité (psycho-cognitif) ;
- la performance visuelle (comportement émotionnel).

Afin de synthétiser cette approche sémantique, nous avons réalisé un tableau récapitulatif de notre étude (Figure 13). Il synthétise et ordonne les terminologies rencontrées couramment lorsque nous abordons les notions de « confort ».

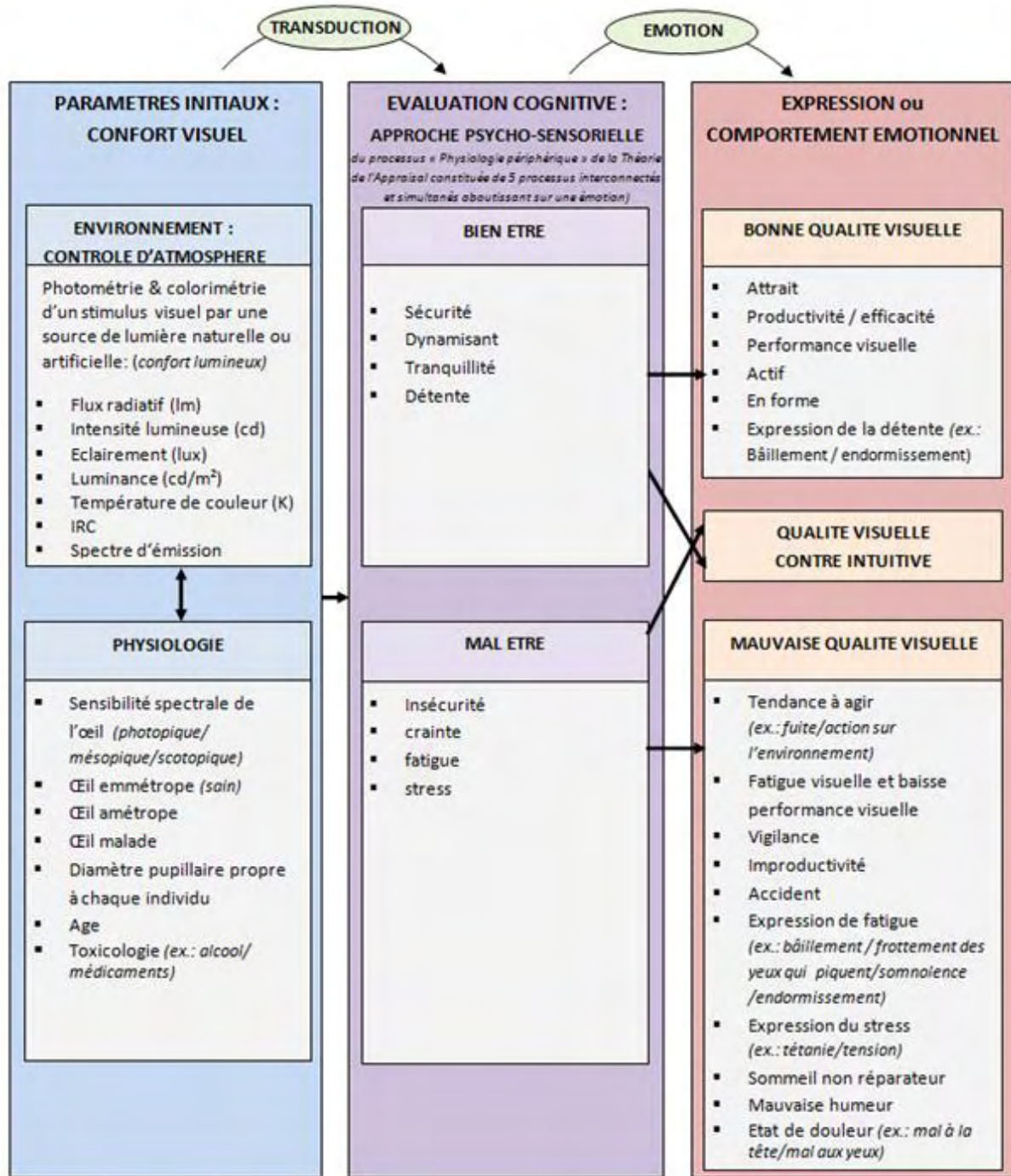


Figure 13 Du confort visuel vers la qualité visuelle

CHAPITRE 2

LUMIERE ET VISION : Physiologie de l'œil humain, mécanismes de perception

INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons nous attacher à définir les caractéristiques physiologiques de l'œil humain et ses mécanismes perceptifs.

Pour cela, nous définirons les éléments constitutifs d'un œil emmétrope (sain), pour l'âge idéal de 20 ans, en termes de caractéristiques physiologiques. Nous mettrons en évidence que le système visuel peut être schématisé via un enchaînement de dioptries et de densités de milieux bien spécifiques.

Cependant, la perception de notre environnement n'est pas stationnaire, et nécessite des composantes à la fois spatiales et aussi temporelles. C'est pourquoi, nous nous intéresserons aux mécanismes de perception d'un objet, du relief, de la lumière, de la couleur, mais également du mouvement. Il faut bien noter que tous ces mécanismes sont interconnectés. Cependant, afin de mettre en exergue des éléments exploitables pour les expériences de notre étude présentées dans le chapitre IV, il convient de les distinguer et de les comprendre. Notre sujet étant centré sur la perception visuelle de la lumière, un accent particulier sera porté sur les mécanismes de perception d'une onde lumineuse tant d'un point de vue énergétique que spectral. C'est pourquoi, et même si cela peut paraître indissociable, nous traiterons indépendamment la perception de la lumière et de la couleur.

La vision et ses mécanismes perceptifs restent un sujet qui a interrogé et interroge toujours de nombreux domaines de compétences. Aussi, cette approche pluridisciplinaire apparaît dans ce chapitre. Nous ferons appel à des notions à la fois d'optique, de psychologie, de neurophysiologie, ou même de biochimie pour appréhender la complexité des mécanismes mis en jeu, sans oublier quelques rappels de données empiriques.

I. PHYSIOLOGIE DE L'ŒIL HUMAIN

1. Anatomie

Voici ci-dessous une coupe de l'œil humain permettant de présenter son anatomie. Il peut s'approximer à une sphère d'environ 25mm de diamètre, dont le volume est de l'ordre de 6,5 cm³, et pesant environ 7g.

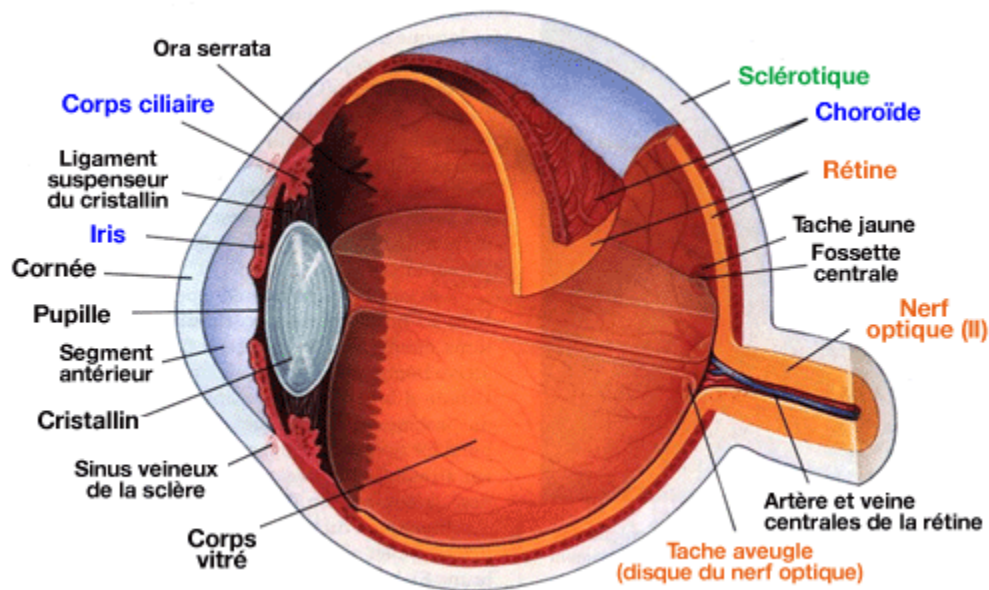


Figure 14 Œil humain en coupe

Un œil humain est complexe et est constitué de nombreux éléments, tels la cornée, l'iris, la pupille, le corps ciliaire, l'uvée, la sclère, l'humeur aqueuse, le cristallin, le zonule de Zinn, le corps vitré, le canal hyaloïde, la rétine, les photorécepteurs visuels : cônes et bâtonnets, le nerf optique, la macula, la fovéa, la papille, la choroïde, les tuniques, et les muscles oculomoteurs.

Remarque : tout au long de ce manuscrit, nous ferons appel à ces termes, aussi leurs définitions figurent dans le glossaire (p207 à 212). Certains de ces termes seront toutefois plus amplement définis dans ce chapitre.

2. L'œil : un système optique

a. Schéma simplifié d'un œil sain (dit aussi œil physique ou réel)

Le système optique visuel peut se simplifier en un ensemble de dioptries et de milieux différents dont les caractéristiques sont fidèles à la réalité :

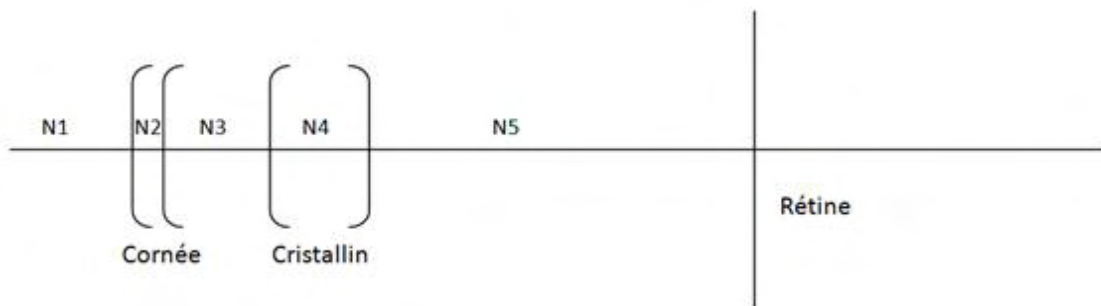


Figure 15 : Schéma simplifié d'un œil humain sain

b. Densité des milieux

- N1 = densité du milieu extérieur où se situe la personne
- N2 = 1,377 [cornée]
- N3 = 1,337 [chambre antérieure]
- N4 = 1,42 [cristallin]
- N5 = 1,336 [corps vitré]

c. Distances entre les dioptries

- Distance cornée/rétine : 25 mm
- Epaisseur de la cornée : variable, plus épaisse aux extrémités et mince au centre (0,45 mm). En moyenne nous la considérons à 0,54 mm
- Epaisseur du cristallin : variable selon l'âge, en son centre = 8,47mm à 20 ans.

d. Rayons de courbure des dioptries :

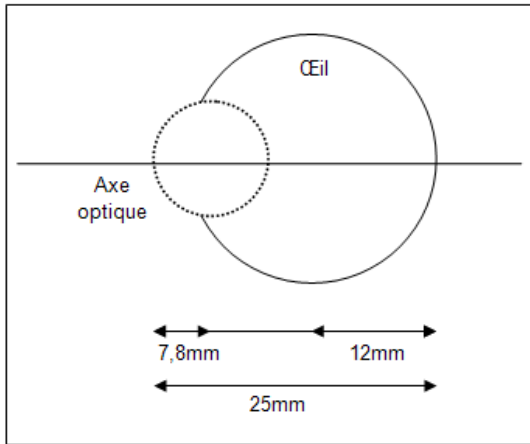


Figure 16 Schématisation de l'œil humain

Très approximativement, nous considérons l'œil comme équivalent à une sphère d'environ 25mm de diamètre mais chaque lentille a un rayon de courbure différent.

Généralement, 90% des cornées ont un rayon de courbure de la face avant compris entre 7mm et 8,5 mm (en moyenne : 7,8 mm). Le rayon de courbure de la face arrière de la cornée est généralement de 6,8 mm. Le rayon de courbure du lobe est, quant à lui, de 12 mm.

Remarque : dans la réalité, ces dioptries ont des valeurs variables selon l'accommodation de l'individu.

II. VISION D'UN OBJET

1. Triplet

Le triplet [source - observateur - objet] est primordial. En effet, il n'y a pas d'intérêt à parler d'objet et de sa perception visuelle sans lumière.

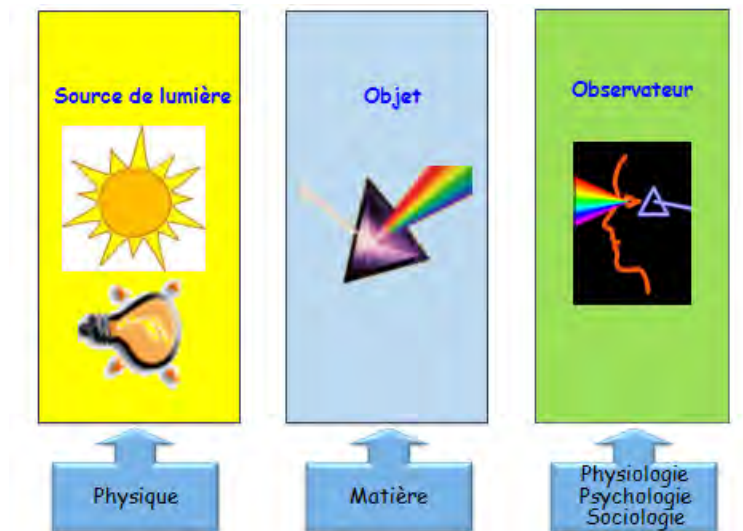


Figure 17 Le triplet et ses composants : source-observateur-objet

D'un point de vue purement physique, nous ne percevons que la matière. Et cette matière, étant capable d'absorber et/ou réfléchir les rayonnements électromagnétiques, va nous paraître colorée et lumineuse de part la sensibilité de notre œil.

2. Mécanisme de la vision : approche globale

D'un point de vue physiologique, l'œil humain est capable de s'adapter en fonction de la quantité de lumière lui parvenant via son ouverture pupillaire. La dynamique du réflexe photomoteur va varier selon l'âge, mais le mécanisme de perception de la lumière reste le même (12 p. 119) et se divise en trois étapes.

a. Optique : formation de l'image sur la rétine.

La lumière traverse les différents milieux constituant l'œil (cornée-humeur aqueuse-pupille-cristallin-corps vitré) et ce n'est qu'après avoir traversé l'épaisseur de la rétine qu'elle parvient aux segments externes des photorécepteurs (les cônes et les bâtonnets).

Par suite, sous l'action des photons, la photo-isomérisation va avoir lieu. Ce mécanisme transforme la « forme » de la molécule de rétinol située dans le segment externe des photorécepteurs. *[Plus de détails sur la photo-isomérisation dans ce chapitre partie IV-3. Cycle de la vision]*

b. Biochimie et codage électrique : transmission de signaux

Le phénomène de transduction vient ensuite, et permet la conversion de l'énergie de la lumière contenue dans l'image en signaux électrochimiques élaborés par les photorécepteurs. Le traitement de l'information se fait ensuite et permet de coder l'image par des trains d'impulsions électriques qui se propagent par les fibres du nerf optique.

c. Neurophysiologie : interprétation

Les informations transmises au cerveau sont interprétées suivant le processus émotionnel cognitif de l'"appraisal" de Klaus Scherer *[cf. Chapitre I]*, ce qui va aboutir à l'interprétation de l'image. Nous sommes dans le domaine neurophysiologique. Notons que des éléments physiques peuvent tromper notre interprétation, nous parlerons d'illusions d'optiques.

Remarque : en **Annexe 1** est détaillé le mécanisme de transmission du signal visuel par voies optiques, et en **Annexe 2**, le système nerveux lié à la vision.

3. Paramètres physiques définissant l'aspect d'un objet

L'apparence d'un objet va varier suivant divers paramètres physiques, qui nous permettent de caractériser son aspect :

- La couleur ;
- La brillance ;
- La forme ;
- La texture ;
- L'opacité ou transparence.

4. Paramètres physiques propres à la détection d'objet

Afin de détecter un objet, l'œil s'attardera sur ces cinq paramètres physiques (13 p. 151) :

- La taille de l'objet ;
- Sa forme ;
- Sa couleur ;
- La luminosité ambiante ;
- Sa distance de perception.

5. Paramètres physiologiques pour la perception d'objet

La perception visuelle d'un objet va dépendre de quatre paramètres physiologiques de l'œil. Dans le cas d'un œil sain, la perception optimale de l'objet dépendra de bonnes définitions :

- Du champ visuel ;
- De l'adaptation lumineuse ;
- De la résistance et sensibilité aux éblouissements ;
- Des contrastes.

A ces composantes spatiales peuvent également s'ajouter des composantes temporelles (vibration de lumière, mouvement).

Remarque : des déficiences ou maladies visuelles peuvent affecter ces paramètres physiologiques et de ce fait impacter sur la perception de l'objet.

a. Champ visuel et appréciation de l'espace

Le champ visuel correspond à l'ensemble des points que nous pouvons percevoir en même temps. Le champ visuel central est compris entre 10° et 20 °, sans déplacement de tête (12 p. 112), pour lequel seulement 1° de l'image peut être analysé finement (13 p. 111). Les autres éléments de l'environnement ne sont connus que s'il y a déplacement de tête et/ou du regard.

L'environnement ainsi perçu constitue une première « image mentale » ou référence mentale, qui peut évoluer, et permette la détection de changements ou dangers.

Ci-dessous le champ visuel de l'homme : œil gauche, œil droit, et champ binoculaire (14 p. 114)

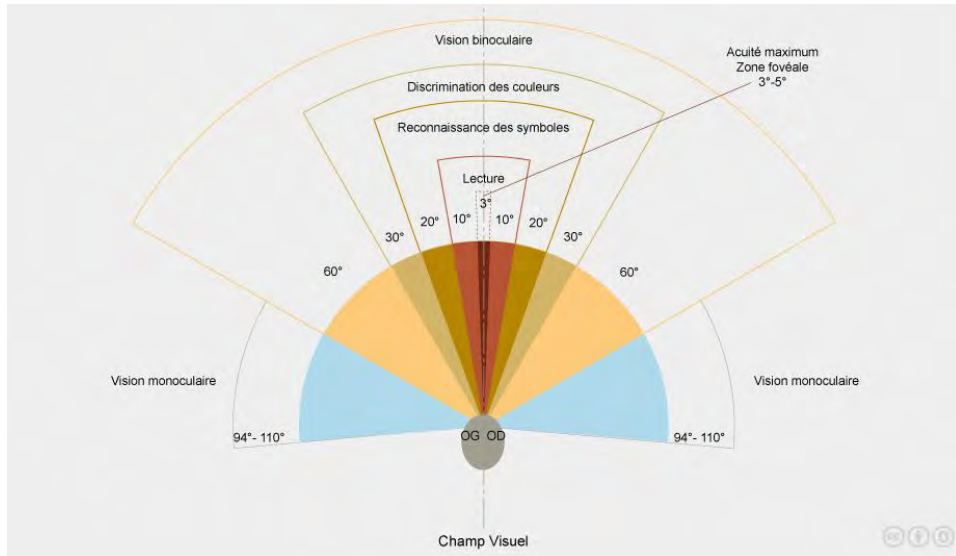


Figure 18 Champ visuel horizontal d'un être humain (15)

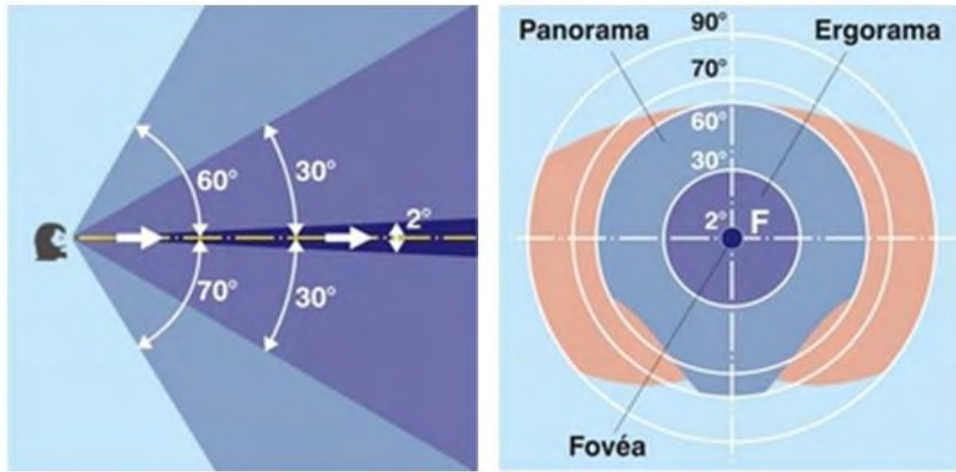


Figure 19 Image de gauche : Champ visuel horizontal - Image de droite : champ visuel vu de face (Zone bleu : vision stéréoscopique) (16)

b. Vision centrale et périphérique

La sensibilité rétinienne est hétérogène. Le maximum se situe sur la fovéa, et une sensibilité nulle se fera sur la tâche aveugle.

La vision centrale, aussi dite fovéale, est beaucoup plus précise que la vision périphérique, ce qui justifie des mouvements de nos yeux ou de tête pour visualiser un objet de face dans l'axe optique de chaque œil [*Plus de détail dans ce chapitre partie VI. Vision du mouvement*].

6. Performance visuelle et facteurs visuels

La performance visuelle définit la précision et la vitesse pour réaliser une tâche visuelle.

Elle s'effectue en quatre étapes (13 p. 85) :

- La détection d'un signal ;
- La discrimination d'un détail ;
- La reconnaissance d'une forme ;
- L'identification du détail.

Elle dépend de la qualité de perception de chacun et de son aptitude à détecter, identifier et analyser une information dans son champ visuel.

La performance dépend de nombreux facteurs visuels dont voici les principaux (13 p. 85) :

- l'acuité visuelle ;
- l'accommodation visuelle ;
- la sensibilité aux contrastes de luminances et de couleur ;
- la qualité de lumière ;
- l'angle d'observation ;
- la durée d'observation ;
- la qualité de perception de l'individu avec ses anomalies, maladies, âge ;
- l'aspect sociologique de l'individu.

Remarque : Ces différentes notions seront abordées tout au long de la thèse.

a. Pouvoir séparateur et acuité visuelle

Le pouvoir séparateur de l'œil est l'angle minimal sous lequel, en vision fovéale, deux points côte à côte sont vus distinctement.

L'acuité visuelle est l'inverse du pouvoir séparateur, et elle est dite normale à 10 dixième, soit quand le pouvoir séparateur est égal à 1 minute d'arc (12 p. 113). Il s'agit de la distinction des détails et c'est l'un des facteurs qui influence le plus la perception visuelle.

Enroth-Cugell et Robson ont défini que « l'acuité visuelle exprime la valeur du pouvoir séparateur des cônes rétiniens qui fonctionnent uniquement par les variations de luminances et sensibles spécifiquement à un composant du spectre lumineux, constitué d'une organisation spatiale, temporelle et énergétique (longueur d'onde) (cellules ganglionnaires) » (13 p. 53).

b. L'accommodation visuelle

L'accommodation correspond à la « mise au point ». Elle permet la vision nette d'objets à distances variables grâce à la déformation du cristallin (bombement sous l'action du corps ciliaire). Ceci dit l'accommodation a des limites, et il existe une distance minimale de vision distincte où la convergence du cristallin atteint sa limite.

« Le mécanisme d'accommodation ne fonctionne correctement que sur des contrastes de luminances ou de clarté. La perception de la profondeur de champ, comme celle du déplacement se fera également sur des contrastes de luminances » (13 p. 52).

Voici un ordre d'idée des distances visibles nettement pour un œil sain (Figure 20) :

- De l'infini à 60m : vision nette sans accommodation (œil au repos)
- De 60m à une distance d : vision nette avec accommodation
- De cette distance d à 0 : pas de vision nette

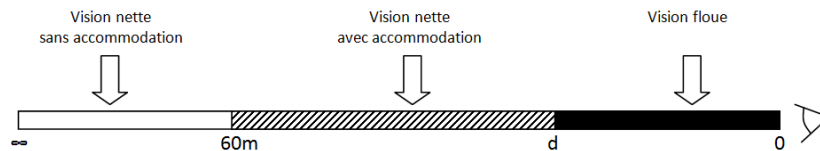


Figure 20 Marge d'accommodation (zone hachurée) d'un œil normal (12 p. 111)

Remarque : avec l'âge, la plasticité du cristallin diminue, le pouvoir accommodatif va donc être affecté, et cette distance d va augmenter (Figure 21):

| Ages (ans) | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|------------------|----|----|----|----|----|----|-----|
| Valeur de d (cm) | 7 | 8 | 10 | 15 | 25 | 40 | 100 |

Figure 21 Modification du pouvoir accommodatif avec l'âge (12 p. 111)

Le graphique Figure 22 nous donne la courbe d'accommodation en fonction de l'âge pour une tâche visuelle de lecture :

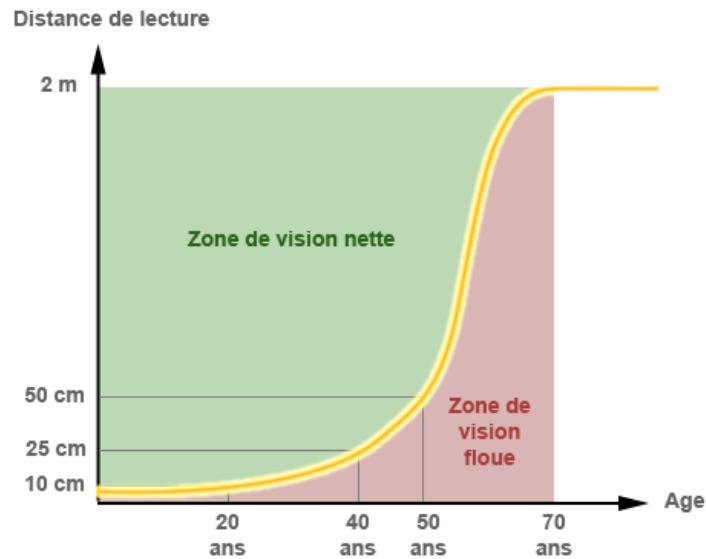


Figure 22 Distance minimale d'accommodation en fonction de l'âge

7. Système hiérarchique du traitement des informations visuelles

Hubel (Professeur de neurobiologie, émérite à l'école médicale de Harvard) et Wiesel (neurophysiologiste suédois) ont reçu ensemble un prix Nobel en physiologie et médecine en 1981, pour leurs recherches sur le traitement des informations visuelles. Ils ont mis en évidence un système hiérarchique de traitement des informations visuelles suivant trois grands ensembles :

- l'information relative à la perception des formes ;
- l'information relative aux couleurs ;
- les informations relatives aux mouvements et localisation, et l'organisation spatiale.

Remarque : si l'un de ces paramètres est altéré, des gênes visuelles seront occasionnées.

III. VISION DU RELIEF

1. Télémétrie

Afin de percevoir en relief, il est nécessaire de percevoir une image en deux dimensions par le système nerveux central. (13 p. 89)

Malgré la courbure de la surface rétinienne, nous pouvons considérer que l'image reçue est bidimensionnelle. La vision centrale, assure la perception nette d'objets proches ou lointains sur la fovéa par accommodation. La vergence des yeux permet ainsi la netteté de l'objet perçu, et apporte une notion de distance également de part l'angle de convergence des yeux. Nous pouvons parler de télémétrie.

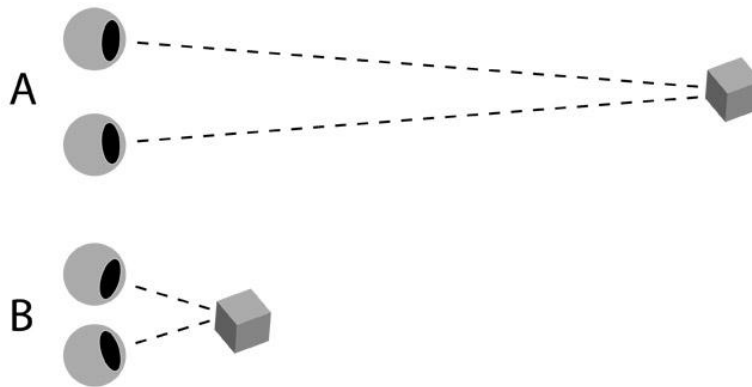


Figure 23 Convergence télémétrique. Les images sont centrées sur la fovéa pour différentes distances. Cas A : objet lointain, cas B : objet proche. L'angle de convergence fournit une information sur la distance comme un télémètre (12 p. 82)

Remarque : la télémétrie n'est possible que pour un objet à la fois.

2. Acuité stéréoscopique

L'acuité stéréoscopique quant à elle est une combinaison de ce phénomène de convergence télémétrique des yeux auquel nous rajoutons une notion de profondeur stéréo (3D).

De part l'écart horizontal entre nos yeux (environ 6,5 cm), les images perçues de chaque œil sont sensiblement différentes. Le principe d'une acuité stéréoscopique réside effectivement sur le fait que les deux images formées sur la rétine de chaque œil sont en léger décalage de quelques secondes d'arc, nous parlons de parallaxe stéréoscopique ou disparité.

Le système visuel combinera alors ces deux images légèrement différentes en une seule, placée dans une espace tridimensionnel.

La vision stéréoscopique concerne principalement les objets assez proches, car avec la distance, les images deviennent trop petites et au-delà de 100 mètres, la vision peut être assimilées comme monoculaire.

Plusieurs paramètres peuvent affecter l'appréciation de distance :

- Variation de position relative de l'individu ;
- Modification de dimensions ;
- Ombres et modelés ;
- etc.

3. Fusion stéréoscopique et rivalité rétinienne

Au moment de la recombinaison des 2 images rétiniennes en une seule, ou fusion stéréoscopique, les informations de chaque image rétinienne vont successivement être combinées et rejetées. C'est ce qui est appelé la rivalité rétinienne.

Lorsque nous regardons à une distance moyenne, les objets beaucoup plus proches et plus lointains ne sont pas fusionnés car trop éloignés sur le plan horizontal. La limite de la fusion stéréoscopique a été étudiée en 1858 par P.L. Panum, physiologiste et pathologiste. Nous parlons de limite de Panum (Figure 24).

Au-delà de 1° d'écart (α) entre les 2 objets et l'œil, le cerveau ne pourra pas faire la fusion, et un des deux objets sera dédoublé. Il s'agit de diplopie.

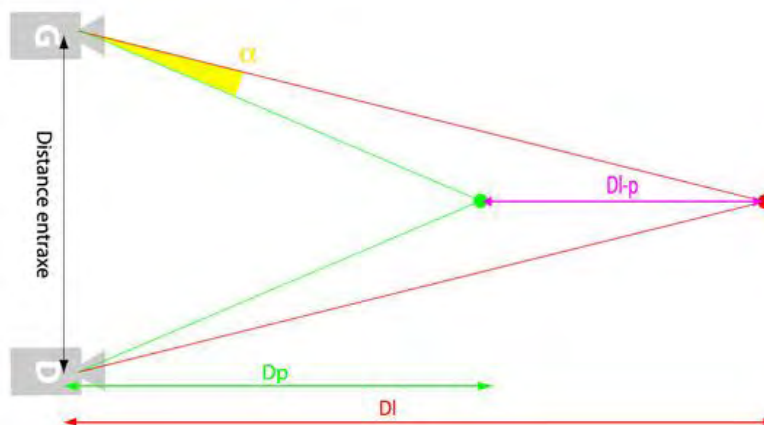


Figure 24 Limite de Panum (17)

4. Vision stéréoscopique et détection des contours

Initialement, nous pensions que la vision binoculaire fonctionnait par comparaison de contours d'objets, or B. Julesz, neuroscientifique visuel et psychologue expérimental, a montré que les lignes et bords des contours d'un objet ne sont pas nécessaires pour que la vision stéréoscopique fonctionne.

Les notions de contours illusoires peuvent fusionner et donner une impression de profondeur.

Il a également été découvert que les figures à point à contrastes de couleur, mais sans contraste de luminance, n'engendrent pas de profondeur, alors que les figures à ligne si. (14 p. 85)

L'hypothèse qu'il existe deux mécanismes cérébraux pour la vision stéréoscopique en découle. Des études complémentaires sont encore en cours.

IV. VISION DE LA LUMIERE

1. Absorption du rayonnement électromagnétique par l'œil

La cornée, l'iris et le cristallin de l'œil vont servir de « filtre » entre la lumière incidente et celle reçue sur la rétine. Chacun de ces filtres, que nous appellerons « média optique », ont leurs propres caractéristiques d'absorption, et transmission. Toutes les longueurs d'ondes du visibles vont pénétrer dans l'œil jusqu'aux photorécepteurs. Mais, les ultraviolets (UV) et les infrarouges (IR) pénètrent également ce qui peut s'avérer dangereux pour notre vision.

Comme nous le voyons sur la Figure 25, pour tout âge confondu, environ 98% des UV sont absorbés par les médias optiques avant d'atteindre la rétine. (Notons que tous les UVC sont absorbés dès la cornée).

Bien qu'une faible transmission d'UVA et d'UVB sur la rétine soit positive, il en résulte que les filtres sont exposés, et des dommages réversibles ou non peuvent apparaître. Citons par exemple des lésions réversibles de l'épithélium cornéen, ou irréversible comme la cataracte. Les IR sont majoritairement absorbés par la cornée, puis par l'humeur aqueuse et le corps vitré. Généralement leur observation va causer des irritations, et à haute énergie, des lésions profondes du stroma voire des perforations. (18)

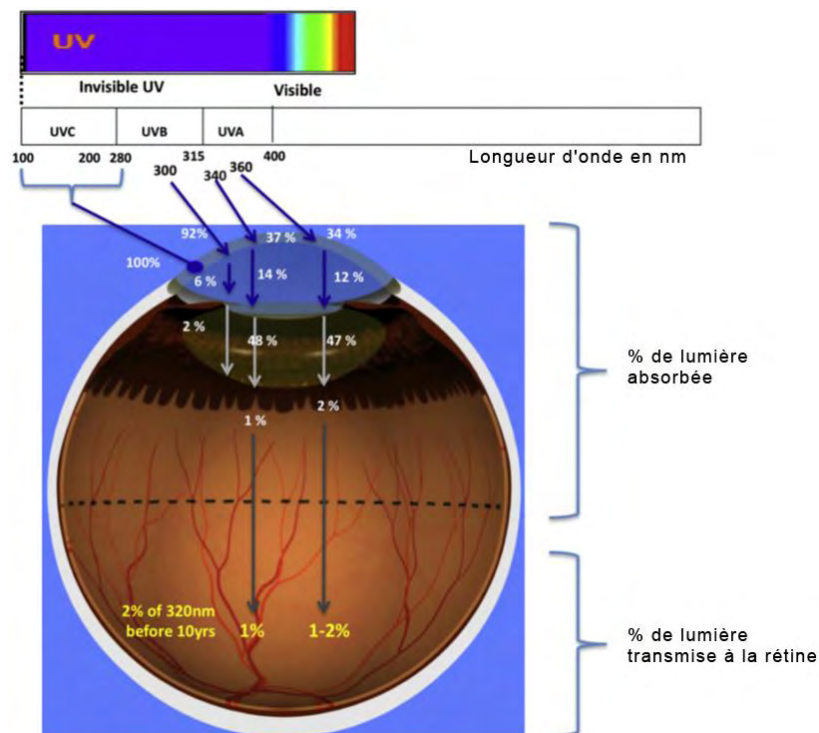


Figure 25 Transmission des UV dans un œil humain emmétrope, pour tout âge (21)

En **Annexe 3**, vous trouverez des informations complémentaires relatives à l'interaction de la lumière sur l'œil humain pour différents âges.

2. Sensibilité rétinienne à l'intensité énergétique de la lumière

a. Vision photopique, mésopique, scotopique.

La sensibilité de l'œil n'est pas la même de jour et de nuit.

Deux formes de sensibilité rétinienne vont émerger car la rétine, comme nous l'expliquons par la suite, possède un double seuil d'excitation :

- Les seuils chromatiques
- les seuils lumineux

Il existe trois grands domaines de fonctionnements :

- Photopique : vision diurne et chromatique. La luminance est supérieure à environ 10 cd/m^2 (valeur non définie avec exactitude) ;
- Scotopique : vision nocturne et achromatique. Le niveau de luminance est bas : inférieur à environ 10^{-3} cd/m^2 (valeur non définie avec exactitude) ;
- Mésopique : vision intermédiaire entre la vision photopique et la vision scotopique. C'est la vision crépusculaire où la luminosité apparente des longueurs d'ondes est différente en photopique et scotopique.

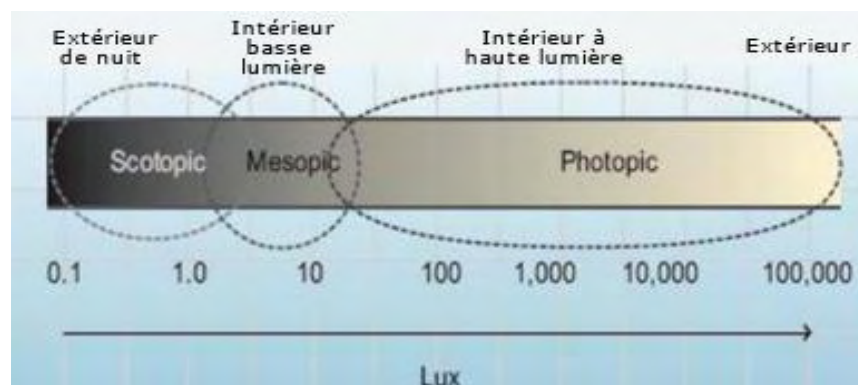


Figure 26 Plage d'éclairagements pour la vision humaine (4)

Si nous résonnons en luminance, nous obtenons le graphe suivant :

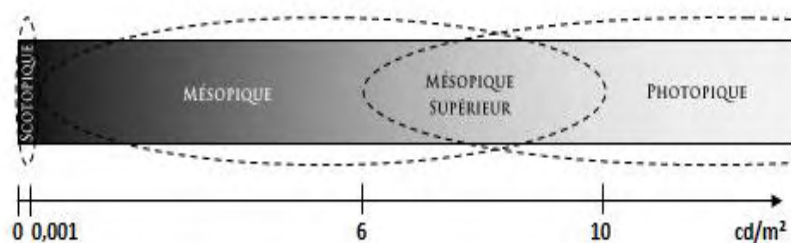


Figure 27 Plage de luminance pour la vision humaine

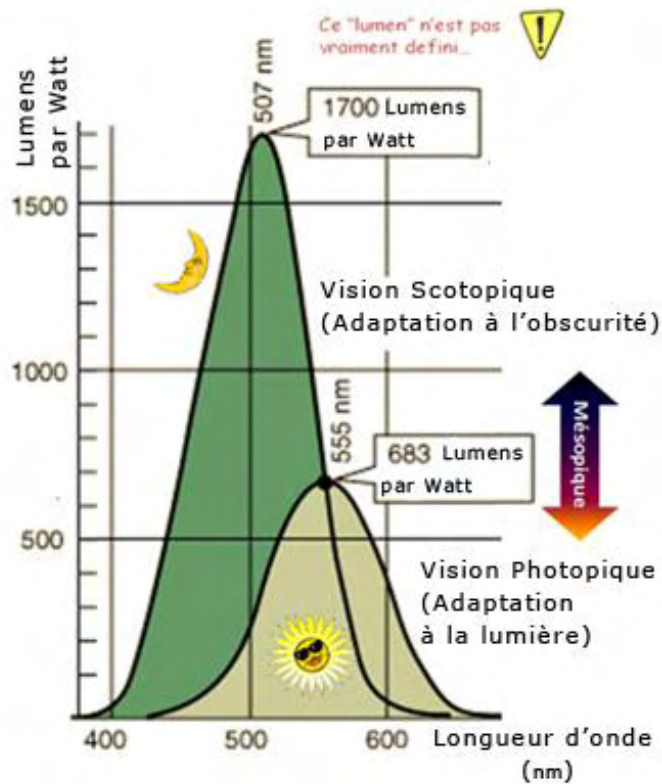


Figure 28 Ordre de grandeur de la vision de l'œil humain en considérant l'efficacité lumineuse (5)

b. Les contrastes de luminance

L'œil est sensible aux variations de luminance qui peuvent induire des gênes visuelles. Ainsi, les contrastes de luminance d'une tâche visuelle de l'ergorama ou panorama (glossaire pp. 207 et 210) sont à contrôler pour éviter ces gênes. Le calcul des contrastes spatiaux de luminance, aussi dits contrastes de Weber-Fechner, sont liés aux valeurs des coefficients de réflexion des matériaux observés. [Cf. *Annexe 4* sur les calculs de contrastes spatiaux de luminance ou contrastes de Weber-Fechner.]

Remarques :

- Les valeurs des contrastes de Weber-Fechner permettent de quantifier le niveau de visibilité d'une tâche ;
- L'œil est également sensible aux contrastes de luminance temporelle ou papillotement de lumière.

3. Cycle de la vision

a. La photo-isomérisation et les réactions biochimiques

Les photorécepteurs

Dans l'œil humain, il existe 3 types de photorécepteur localisés au niveau de la rétine.

- Les cônes
- Les bâtonnets
- Les cellules ganglionnaires ipRGC

Les cônes et bâtonnets interviennent dans le mécanisme de la vision contrairement aux ipRGC.

D'une manière générale, la vision photopique (de jour) se fait principalement par les cônes qui permettent la perception des couleurs. Ils sont situés en grand nombre dans la région centrale de la rétine (la fovéa) où l'acuité visuelle est la meilleure. Les cônes périphériques permettent la vision du mouvement.

Les bâtonnets, quant à eux, permettent la vision scotopique (nocturne) en niveaux de gris. Ils sont sensibles à l'intensité lumineuse, et sont capables de fonctionner en faible lumière. Ils sont par contre saturés en conditions photopiques. Les bâtonnets couvrent la quasi-totalité de la surface rétinienne,

mais comme ils sont situés en périphérie de la fovéa, l'image reçue est floue et peu contrastée.

Il existe un troisième type de photorécepteurs appelé ipRGC qui n'a pas de fonction visuelle mais impacte sur le rythme biologique de l'organisme. Il s'agit d'une cellule ganglionnaire répartie sur toute la rétine, et qui est plus fréquente et sensible dans la partie inférieure de l'œil. A titre indicatif, l'ipRGC contient une protéine photosensible appelée la mélanopsine qui est sensible à la lumière bleue du visible (460 nm). Nous ne détaillerons pas plus les informations concernant l'ipRGC car elles ne sont pas directement liées à ce sujet de recherche.

La Rhodopsine

La rhodopsine, ou pourpre rétinien, est un pigment protéique caractéristique présent dans les membranes des sacculés situées au niveau du segment externe des bâtonnets et cônes (Figure 30).

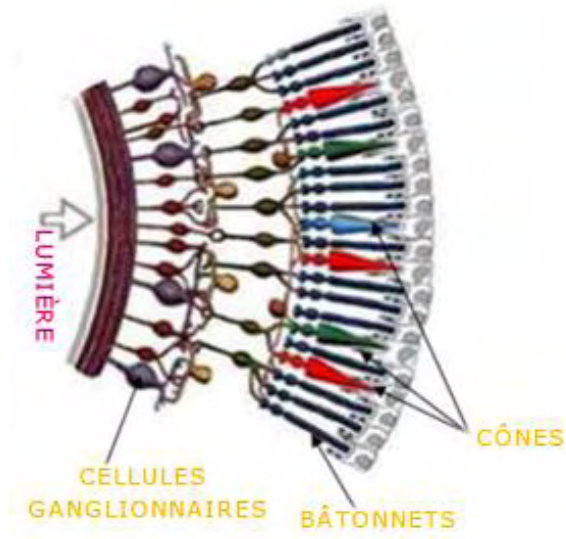


Figure 29 La rétine humaine et ses photorécepteurs (82)

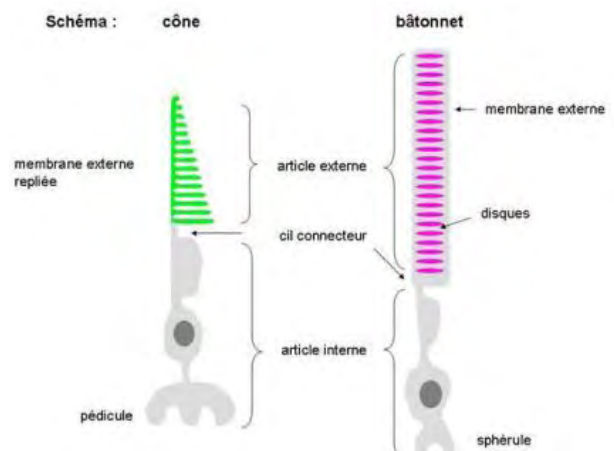


Figure 30 Schéma des cônes et bâtonnets de l'œil humain, photorécepteurs intervenant dans la vision (82)

Il est photosensible et responsable de la sensibilité de l'œil à la lumière. Pour l'œil humain, le pic d'absorption de la rhodopsine est à $\lambda = 507$ nm (bleu vert), là où le seuil lumineux est minimal.

Chaque rhodopsine est composée de deux parties :

- L'opsine : molécule protéique ;
- Le rétinol (ou rétinène) : radical chromophore dérivé de la vitamine A.

Seul le rétinol interagit avec la lumière. Il est déployé en présence de lumière (forme «trans-») et replié dans le cas contraire (forme «cis-») : c'est la photo-isomérisation.

Suite à la photo-isomérisation, une cascade de réactions biochimiques a lieu. C'est un processus complexe qui se réalise en 7 étapes majeures, que nous précisons à titre indicatif en **Annexe 5**, cycle de réactions biochimiques induites par photo-isomérisation.

4. Adaptation aux variations lumineuses

Face à une stimulation lumineuse, le réflexe pupillaire va permettre de doser la quantité de lumière qui parviendra aux photorécepteurs rétiniens. La réponse de l'œil va donc dépendre de la lumière émise aux photorécepteurs, tant d'un point de vue spectral qu'énergétique.

De manière générale, nous constatons que le passage d'une ambiance sombre vers une ambiance lumineuse se fait par adaptation rapide, alors que le passage d'une ambiance lumineuse vers une ambiance sombre demande un temps d'adaptation plus long.

Détaillons ci-après les notions et mécanismes mis en jeu.

a. Le réflexe pupillaire

Diaphragmation

La quantité de lumière entrant dans notre œil est en permanence filtrée par la pupille. Il s'agit du réflexe pupillaire. Le diamètre d'ouverture pupillaire est contrôlé par la contraction ou dilatation de l'iris, c'est la diaphragmation.

Cette ouverture pupillaire peut varier entre 1mm et 8mm pour un œil normal, ce qui équivaut à une variation de flux entrant d'un facteur 30. (13 p. 48)

Aucun individu n'a exactement la même ouverture pupillaire, et, au repos, la taille d'ouverture pupillaire est comprise entre 3mm et 5mm.

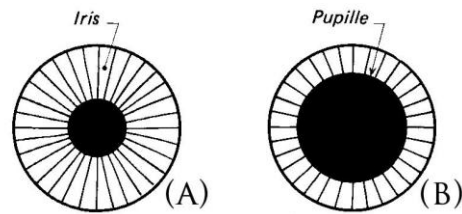


Figure 31 Variation du diamètre pupillaire de la pupille: a) à la lumière et b) à l'obscurité (12 p. 112)

L'adaptation à la quantité de lumière qui entre dans l'œil est assez rapide et le réflexe pupillaire se décompose en deux réflexes :

- Le réflexe photomoteur : l'iris réagit à la lumière observée (ou luminance d'adaptation), ainsi la pupille va quasi instantanément se contracter (myosis) en présence de lumière ou se dilater (mydriase) dans l'obscurité.
- Le réflexe consensuel : quand on éclaire un œil, les deux pupilles se contractent, et « normalement, les pupilles demeurent symétriques même si l'éclairage est asymétrique » (19)

Remarque : Il semblerait que l'état émotionnel de l'individu impacte également sur l'ouverture de l'iris.

Diamètre pupillaire en fonction de la luminance d'adaptation

Plusieurs formules proposent une approche du diamètre pupillaire (dp) en fonction de la luminance d'adaptation L (13 p. 49) :

- Formule de S.G de Groot et JW Gebhard (De Groot, 1952) :

$$dp = 5 - 3 \tanh(0,4 \cdot \text{Log } L)$$

- Formule de Y. Le Grand (Le Grand, 1956) :

$$dp = 8 - 0,6875 (\text{Log } L + 5)$$

Age et modification du diamètre pupillaire

Le diamètre pupillaire se rétrécit au fil des ans, et, par exemple, lors de l'adaptation à la lumière le diamètre apparent va changer :

- Dans l'obscurité, lorsqu'il était de 7 mm à 20 ans, il sera de 5 mm à 80 ans ;
- A la lumière, lorsqu'il était de 4 mm à 20 ans, il sera de 3 mm à 80 ans.

Diamètre pupillaire et réception visuelle : éclairage rétinien / aberrations / diffraction

Le diamètre pupillaire est capable de conditionner trois paramètres de la réception visuelle :

- L'éclairage rétinien ;
- Les aberrations ;
- Les diffractions.

➤ **Eclairage rétinien et acuité visuelle**

L'éclairage rétinien est défini en lux. Il correspond à la quantité de lumière parvenant sur les photorécepteurs rétiniens. Il va diminuer avec le diamètre de la pupille. Afin de le calculer, il est nécessaire de considérer les transmissions des différents milieux constitutifs de l'œil, en fonction des longueurs d'onde.

Ainsi, il faut veiller à considérer que les rayons inclinés sont moins efficaces que les rayons tombant normalement sur la rétine, il s'agit de l'effet Sillies-Crawford : (13 p. 49)

Voici la formule définissant l'éclairage rétinien : (13 p. 50)

$$Er = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot L Sp \tau(\lambda)$$

Er : Eclairage rétinien en lx

L : luminance d'adaptation de test en cd/m²

Sp : surface pupillaire en mm²

$\tau(\lambda)$: transmission des milieux de l'œil dépendant de la longueur d'onde λ

Ne pouvant déterminer la valeur de $\tau(\lambda)$, l'équation est transformée et fait intervenir une nouvelle unité : le Troland (Td) intégrant $\tau(\lambda)$ et le coefficient numérique.

$$Er = L Sp$$

Er en Troland

L : luminance d'adaptation de test en cd/m²

Sp : surface pupillaire en mm²

La Figure 32 donne une approche de la valeur de l'éclairement rétinien en fonction de la luminance d'adaptation.

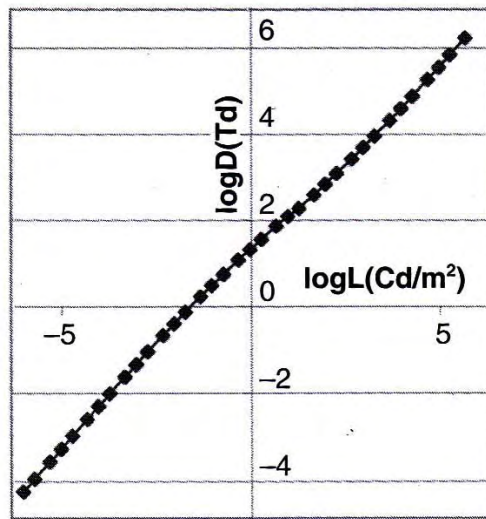


Figure 32 Eclairement rétinien D ou Er en fonction de la luminance d'adaptation L (13 p. 50)

➤ Les aberrations

Elles sont « de diverses natures liées aux lois de l'optique géométrique (citées dans les limites de l'approximation de Gauss). Tous les rayons issus d'une même source ponctuelle ne convergeront pas en un seul point, et l'image de la surface plane ne sera pas sur une surface plane » (20 p. 114) Lorsqu'il y a peu de lumière, le diamètre pupillaire augmente et les aberrations vont aussi augmenter. Ainsi, les plus grandes aberrations auront lieu en vision scotopique (très peu d'effets en mésopique et photopique). Les aberrations chromatiques dépendent de la longueur d'onde. En lumière monochromatique, l'acuité visuelle est meilleure aux longueurs d'ondes moyennes. Le bleu et rouge créant des conditions moins favorables. (20 p. 114)

Plus de détails en [Annexe 6](#) sur les aberrations chromatiques.

➤ Les diffractions

Lorsqu'il y a beaucoup de lumière, l'ouverture pupillaire diminue. La résolution va atteindre des limites ce qui induit des problèmes de diffraction.

Plus de détails en [Annexe 6](#) pour les problèmes de diffraction.

b. Adaptation à la lumière

Sensibilité des photorécepteurs en fonction des conditions lumineuses

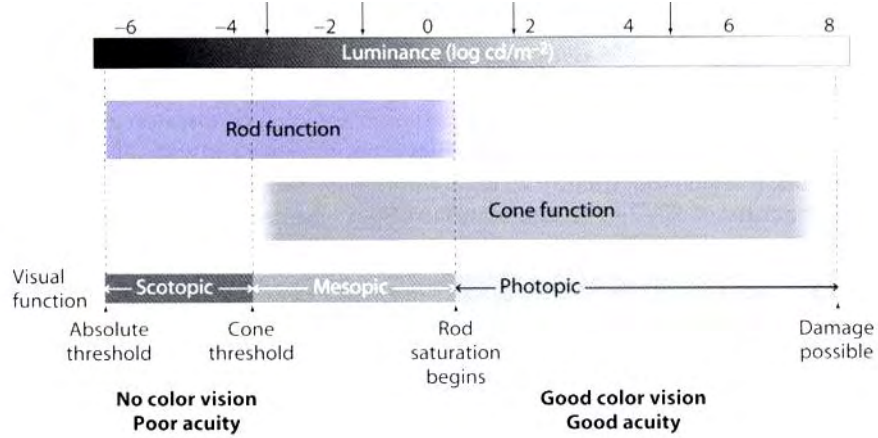


Figure 33 Domaine d'action des photorécepteurs selon les conditions lumineuses (27)

En fonction des l'ambiance lumineuse (photopique, mésopique ou scotopique) les photorécepteurs vont entrer en activité ou atteindre leur seuil. Les bâtonnets ne fonctionneront qu'en conditions scotopiques ou début mésopique. Le relais sera ensuite fait par les cônes pour la vision photopique et fin mésopique.

Adaptation lumineuse

L'œil humain, de part sa physiologie, sait s'adapter à de grandes variations lumineuses pouvant aller de 0,0003 lux (nuit sans lune) à 100 000 lux (soleil en plein été). C'est le phénomène physiologique d'adaptation lumineuse.

La réponse seuil d'un cône nécessite 1000 fois plus d'énergie que pour celle des bâtonnets. Il est important de noter que les temps de latence des 3 types de cônes et des bâtonnets diffèrent car entrent en considération les états de polarisation des cellules bipolaires et ganglionnaires (21).

Adaptation à la lumière et acuité visuelle

Pendant la phase d'adaptation à un niveau de luminosité, la sensibilité des photorécepteurs va lentement changer comme nous l'avons vu précédemment. (Figure 28)

A partir d'un certain niveau de lumière, l'acuité visuelle n'augmente plus. Pour un œil sain, c'est aux alentours de 3000 lux.

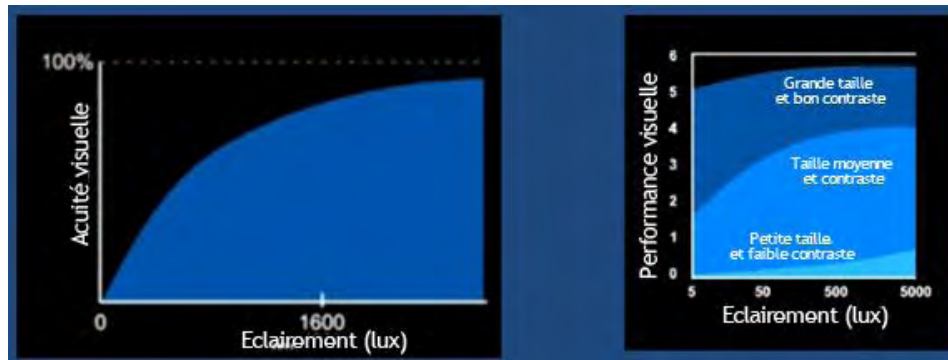


Figure 34 Acuité visuelle en fonction du niveau d'éclairément (4)

Adaptation à la lumière et perception d'un objet se rapprochant

Lorsqu'un objet se rapproche de l'œil, il y a resserrement de la pupille, et il y a simultanément de trois réflexes :

- Bombement du cristallin pour l'accommodation ;
- Contraction de l'iris (ou diaphragmation) ;
- Convergence des axes oculaires.

La contrepartie, est qu'en vision proche la pupille se resserre, ce qui améliore la netteté mais diminue la quantité de lumière entrante.

c. Adaptation à l'obscurité

Adaptation des photorécepteurs

Il faut savoir que la rhodopsine, ou pourpre rétinien, est décolorée par la lumière, ainsi, lorsque nous passons brutalement d'une forte lumière à une lumière semi-obscurité, il faut un temps d'adaptation. Ce temps correspond au délai nécessaire au pourpre rétinien décomposé par la lumière pour se reconstituer. (12 p. 114)

Il a été montré que selon les longueurs d'ondes l'adaptation à l'obscurité ne se produisait pas exactement de la même manière d'un point de vue biochimique. Une fois les cônes ayant été stimulés par la lumière, ils vont récupérer à des rythmes différents de celui des bâtonnets, et dans certains cas au même rythme. C'est ce que nous allons étudier ci-après.

Intervalle photochromique

Afin de comprendre les différentes courbes d'adaptation à l'obscurité, il est nécessaire de définir l'intervalle photochromique.

Il s'agit en fait de la différence de sensibilité (ou seuil) pour le système cône et bâtonnets pour chaque longueur d'onde.

Le graphe ci-dessous nous présente, après mise à une même échelle de sensibilité, les variations de sensibilité en photopique (courbe verte des cônes) et en scotopique (courbe mauve des bâtonnets). La différence verticale de sensibilité pour chaque longueur d'onde représente l'intervalle photochromique. (22)

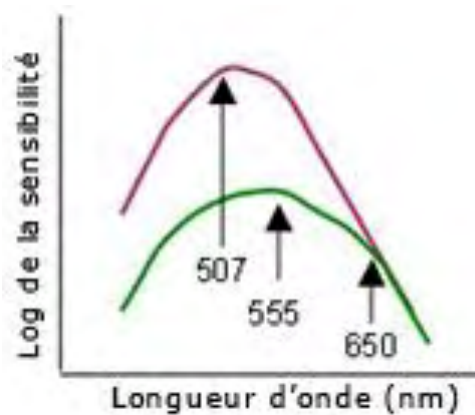


Figure 35 sensibilité relative des cônes (photopique en vert) et bâtonnets (scotopique en mauve) (22)

Nous remarquons que la plus grande variation photochromique est obtenue à 507 nm. A partir de 650nm les courbes sont juxtaposées et l'intervalle photochromique n'existe plus. Les bâtonnets ne sont pas sensibles à cette longueur d'onde.

Fonction d'adaptation à l'obscurité

Dans le graphique ci-dessous, deux cas sont présentés et permettent d'obtenir deux types de courbes d'adaptation à l'obscurité. (22)

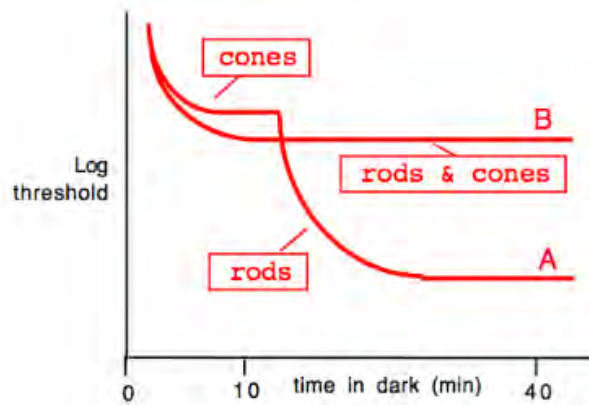


Figure 36 Fonction d'adaptation à l'obscurité (« rods » signifie bâtonnets) (22)

Courbe A :

Si les photorécepteurs ont été soumis à une très forte luminance, et qu'ils ont donc tous été initialement stimulés à une lumière à 420nm, lorsque nous testons les seuils d'adaptation à l'obscurité, la demie-vie des bâtonnets met 5 minutes pour récupérer, alors que les cônes ne mettent que 1 minute et 30 secondes.

La courbe A passe par plusieurs phases :

- une reprise de sensibilité des cônes qui atteint son seuil ;
- Puis une rupture «bâtonnet-cône» ;
- A partir de ce point, les bâtonnets sont plus sensibles que les cônes, jusqu'à atteindre un seuil minimum (ou plateau) correspondant à une sensibilité maximale.

Ces différentes étapes sont dues à l'intervalle photochromique qui révèle qu'à 420 nm, la sensibilité des bâtonnets est effectivement bien plus grande que celle des cônes.

Il a été également constaté pour l'adaptation à l'obscurité, que plus l'intervalle photochromique est grand, plus la rupture «bâtonnet-cône» est prononcée et plus la distance entre le plateau des cônes et bâtonnets est grande.

Courbe B :

La courbe B a été obtenue après avoir soumis tous les photorécepteurs à une longueur d'onde de 650 nm, où l'intervalle photochromique est nul. Les cônes et bâtonnets ont donc, à cette longueur d'onde, la même sensibilité. Sachant cela, il n'est pas surprenant que la courbe B d'adaptation à l'obscurité des cônes et bâtonnets ne présente pas de cassure « bâtonnet-cône ».

Remarque : en *Annexe 7* sont proposés des compléments d'information concernant l'impact de l'âge sur le temps d'adaptation à l'obscurité.

V. VISION DES COULEURS

1. Mécanisme de perception trichromatique

a. Principe de la vision des couleurs

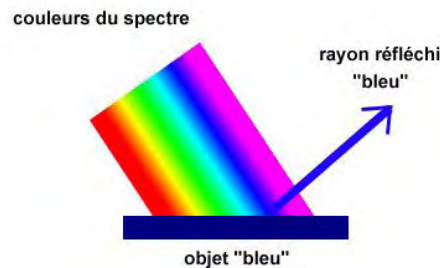


Figure 37 Illustration du principe de vision d'un objet en couleur (23)

La Figure 37 illustre qu'un objet nous paraît bleu car, lorsqu'il est éclairé, il absorbe toutes les longueurs d'ondes sauf celle du bleu qui est réfléchi.

b. Localisation des photorécepteurs

Les photorécepteurs sont localisés sur la rétine de chaque œil. Cependant, la répartition des photorécepteurs visuels est hétérogène, et nous distinguons deux zones (Figure 38) :

- La fovéa : c'est la région centrale de la rétine (5 degrés d'angle) où l'acuité visuelle et la résolution spatiale sont les meilleures. Les cônes y sont majoritairement localisés (150 000 cônes/mm²). La fovéola est une zone très petite (1 degré d'angle) située à l'intérieur de la fovéa qui correspond à la zone de fixation qui ne contient que des cônes rouges et verts.
- Périphérie de la fovéa : cette zone représente la quasi-totalité de la surface rétinienne, et contient majoritairement des bâtonnets. Il n'y a qu'une très faible densité de cônes. C'est la zone spécifique à la perception de faibles luminosités (vision scotopique). Se sont les cônes en périphérie qui permettent la détection de mouvements. Il n'y a pas de perception détaillée.

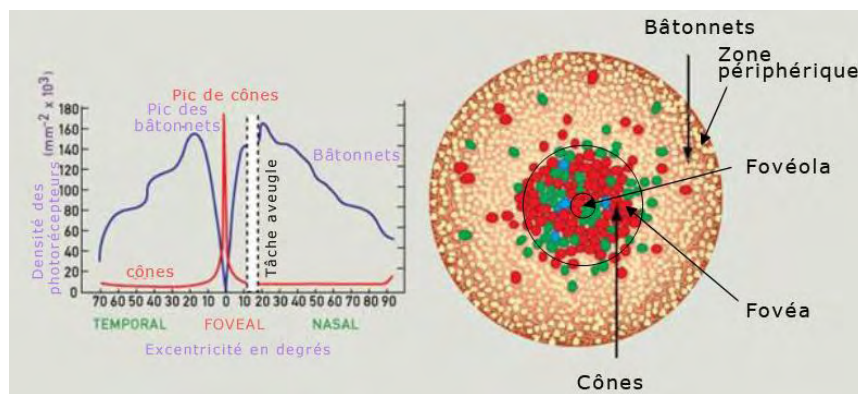


Figure 38 Répartition des cônes et bâtonnets sur la rétine. A gauche : localisation et densité de cônes et bâtonnets - A droite : rétine vue de face : cônes RVB en points rouges, verts et bleus et bâtonnets en points blancs (24)

c. Trichromatisme

La sensibilité spectrale de l'œil fait que nous percevons des longueurs d'ondes comprises entre 380 nm et 760 nm (le visible). Ceci étant possible par les 3 types de cônes qui font que notre perception est trichromate.

Remarque : nous ne pouvons pas distinguer plus de 150 couleurs dans le spectre coloré.

d. Les cônes

Les photorécepteurs visuels mis en jeu pour la perception visuelle de la couleur sont les cônes. Comme nous l'avons mentionné précédemment il existe 5 millions de cônes, localisés en région centrale de la rétine. Ils sont responsables de la vision diurne et débutent leur réponse pour des luminances supérieures à $0,1 \text{ cd/m}^2$.

Il existe trois catégories de cônes :

- les cyanolabes ou S (Short) avec un pic d'absorption à $\lambda = 425 \text{ nm}$ (réponse centrée dans le bleu)
- les chlorolabes ou M (Moyen) avec un pic d'absorption à $\lambda = 535 \text{ nm}$ (réponse centrée dans le jaune-vert)
- les erythrolabes ou L (Long) avec un pic d'absorption à $\lambda = 565 \text{ nm}$ (réponse centrée dans le rouge -orangé)

Remarques :

- En rapport de quantité, pour un cône de type S il y a 100 cônes de types M et L. (Ceci montre bien que les cônes S sont en nombre minoritaires.)
- La sensibilité spectrale des bâtonnets a un pic à 498 nm.

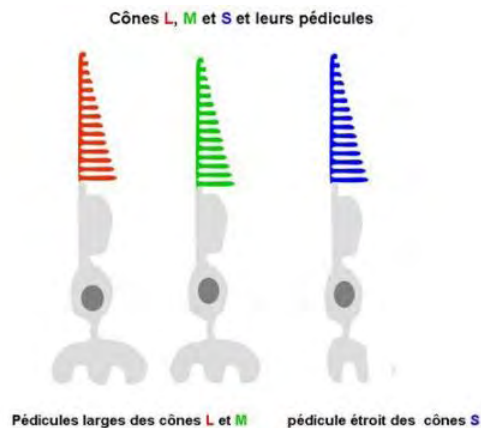


Figure 39 Cônes Rouges (L), Verts (M) et bleus (S) – en couleur est représentée la membrane externe. (25)

La sensibilité spectrale est différente pour chaque type de cônes, ce qui est illustré par la Figure 40, et la sensibilité relative de tous les photorécepteurs visuels est représenté par la Figure 41.

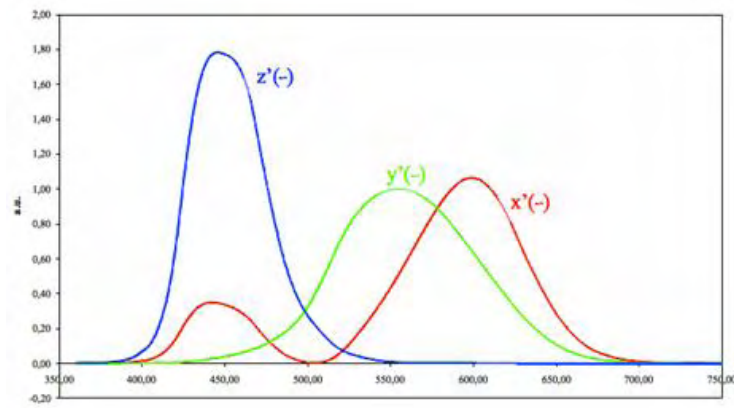


Figure 40 Sensibilité spectrale des cônes de la CIE 1931- spectres $x'(\lambda)$: rouge, $y'(\lambda)$:vert, $z'(\lambda)$ bleu, avec λ en nm (26)

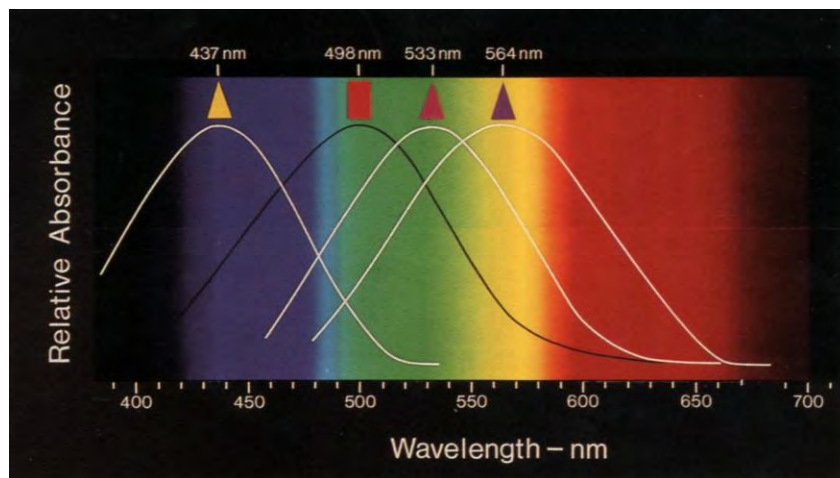


Figure 41 Sensibilité relative des photorécepteurs (représentation des cônes par des triangles et des bâtonnets par un rectangle) (27)

e. Adaptation chromatique

L'adaptation chromatique correspond à la capacité du système visuel à ajuster sa perception chromatique. Si la couleur de l'illuminant varie, le système visuel préservera l'aspect de couleur de l'objet éclairé. (24)

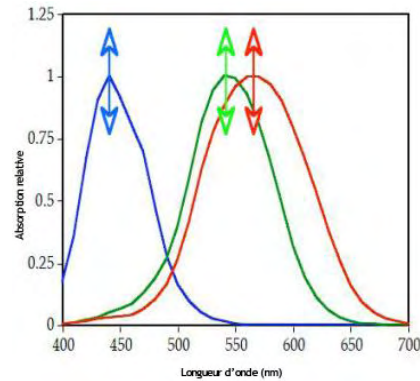


Figure 42 Ajustement chromatique indépendant pour chaque cône (30)

Prenons l'exemple d'une feuille de papier blanche éclairée par une lampe à incandescence, puis par une lampe fluo compacte. Les spectres d'émission de ces deux sources sont différents, cependant, quelle que soit la source de lumière, la feuille nous paraîtra toujours blanche.

Autre exemple avec cette photo où au premier regard nous ne réalisons pas que le côté gauche est bleuté et le droit jaune.

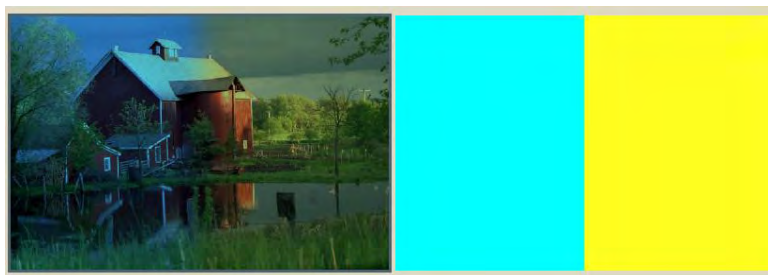


Figure 43 Exemple d'ajustement chromatique (24)

f. Mélange chromatique

Additivité des couleurs

Selon la théorie de Thomas Young (physicien, médecin et égyptologue britannique) et d'Hermann Von Helmholtz (physiologiste et physicien allemand), la perception des couleurs n'est possible que par combinaison des trois couleurs primaires rouge, vert et bleu (RVB). C'est le trichromatisme.

Les lumières suivent le système d'additivité des couleurs, contrairement à la peinture qui suit le système soustractif. Ainsi, par le « mélange » des trois couleurs primaires RVB, perceptibles directement par nos cônes, nous obtenons de la lumière blanche.

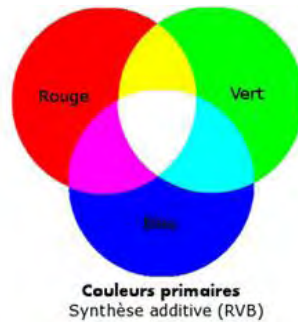


Figure 44 Synthèse additive de la lumière colorée (27)

g. Mécanisme d'opposition

Certaines couleurs peuvent se « mélanger », d'autres non tels le rouge-verdâtre ou le jaune-bleuâtre, ce que la trichromatie n'explique pas.

Karl Ewald Konstantin Hering, physiologiste prussien, ayant relevé le problème de la couleur jaune parmi les couleurs fondamentales a développé et mis en place un mécanisme d'interaction par couples opposés de 4 couleurs: Bleu,Jaune, Vert, Rouge et une opposition Noir, Blanc correspondant à la luminosité.

Dans ce mécanisme, Hering fait l'hypothèse qu'il existe trois types de récepteurs (Figure 45) :

- Rouge/Vert ;
- Bleu/Jaune ;
- Noir/Blanc.

Le jaune peut certes avoir une dominante rouge ou verte, mais pas bleue car ces couleurs s'opposent. En effet, ce sont des couleurs antagonistes dont le mélange crée du gris (28).

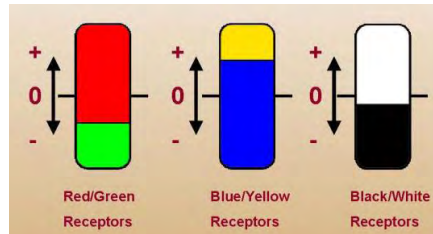


Figure 45 Les trois types de récepteurs du mécanisme d'opposition d'Hering (24)

h. Théorie de zone

La théorie de zone (Figure 46) a vu le jour au XX^{ème} siècle et a pour objectif d'unifier les deux théories : la trichromatie et le mécanisme d'opposition (théories jugées jusqu'alors antagonistes).

Cette théorie est un modèle colorimétrique hybride qui consiste à considérer que les deux théories interviennent toutes les deux. Les cônes sont trichromates (RVB) et les signaux qu'ils transmettent sont « transformés en signaux antagonistes selon un processus adapté à la luminance et deux processus adaptés à la chrominance. Les neurones du cerveau seraient donc sensibles uniquement à un système de couleurs antagonistes » (28).

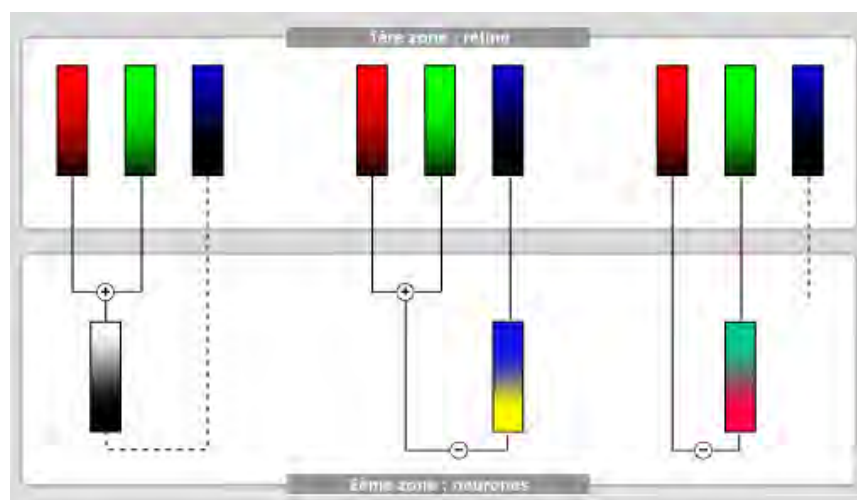


Figure 46 Schéma de la théorie de zone (28)

La Figure 46 permet de mieux comprendre la conversion RVB (au sein de la zone rétinienne) en couples d'opposition (au niveau des neurones) :

- Le 1^{er} cas montre que par additivité du rouge et du vert reçus par la rétine, une information de luminance est transmise aux neurones. Le canal vert-rouge est donc achromatique ;
- Le 2nd cas illustre la conversion RVB en couple d'opposition bleu jaune ;
- Le 3^{ème} cas illustre la conversion RVB en couple d'opposition rouge vert ;
- Les neurones correspondent aux cellules ganglionnaires qui sont excitatrices ou inhibitrices.

Remarque : Dans le mécanisme, le canal bleu n'est pas relié à une information de luminance. Et en effet, la perception d'une longueur d'onde bleue ne sera pas filtrée par l'ouverture pupillaire de notre œil, d'où les risques liés à la lumière bleue.

2. Théorie sur la vision des couleurs

a. Subjectivité de la perception des couleurs

« La vision des couleurs est une sensation subjective, de nature psychologique, mais dont l'origine est physique. » (29 p. 79) Ainsi, la concordance entre les domaines pourrait se résumer par le tableau suivant :

| PHYSIQUE | PSYCHO-PHYSIQUE = COLORIMETRIE | PSYCHO-SENSORIEL = POINT DE VUE SENSATION VISUELLE | |
|---|--------------------------------------|--|--|
| intensité énergétique du rayonnement | Luminance | Luminosité (clarté) <i>Sensation « sombre » ou « clair » Valable pour des valeurs chromatiques et achromatiques*</i> | |
| longueur d'onde | Longueur d'onde dominante | Tonalité <i>Désignation par nom d'une couleur</i> | Tonalité + saturation <i>= caractère chromatique de la sensation</i> |
| répartition spectrale de l'énergie | Pureté colorimétrique | Saturation <i>Différenciation de la tonalité d'un gris de même clarté</i> | |

*Valeurs achromatiques : blanc, gris, noir

Figure 47 Vision des couleurs : concordance physique, colorimétrie et sensation (29 p. 79)

La Figure 47 fait appel à des notions de luminosité, tonalité et saturation, que nous définissons succinctement dans la suite de ce chapitre.

a. Composantes de la couleur

La couleur peut être définie selon trois paramètres :

- La luminosité : il s'agit d'une sensation de clarté, pouvant aboutir à une sensation de brillance ou d'éclat. La luminosité se mesure par la luminance ;
- La saturation : elle correspond à la pureté d'une couleur. De manière simple, une couleur saturée apparaît parfaitement pure, vive et intense, et une couleur désaturée sera terne, rabattue, comme mêlée de gris ;
- La teinte : synonyme de tonalité. Elle est définie par des noms de couleurs, relatives aux longueurs d'ondes du spectre.

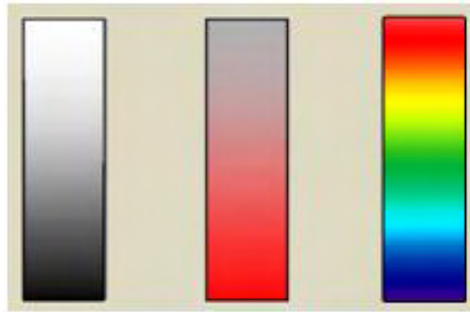


Figure 48 Schéma présentant de gauche à droite : la luminosité, la saturation et la teinte (24)

b. Les composantes et quelques effets visuels

Luminosité et longueur d'onde

Les longueurs d'ondes ne possèdent pas la même quantité d'énergie ce qui fait que les radiations électromagnétiques ont des luminosités différentes, et qu'elles sont plus ou moins bien perçues par l'œil. Le graphe ci-dessous présente l'efficacité lumineuse de l'œil humain en fonction des longueurs d'ondes. (Courbe issue d'une moyenne et pouvant quelque peu varier d'un individu à un autre)

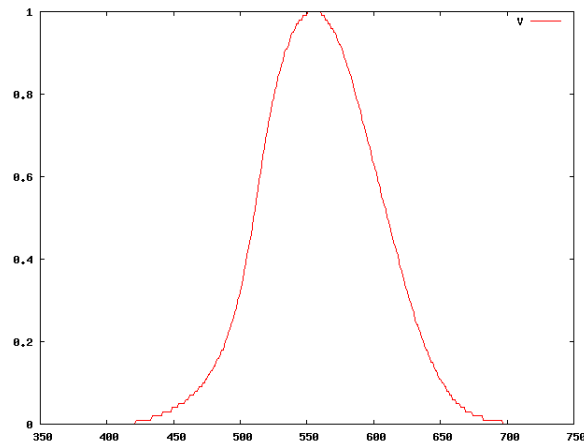


Figure 49 Courbe de sensibilité spectrale de l'œil humain de la CIE 31 (30)

Ainsi, les couleurs aux extrémités : rouge et violet seront perçues comme plus sombres que le jaune ou l'efficacité lumineuse est plus forte.

L'effet Purkinje :

L'effet Purkinje, défini par Jan Evangelista Purkinje, anatomiste, est le phénomène qui traduit l'augmentation de la sensibilité de l'œil vers les courtes longueurs d'onde lorsque nous passons de conditions photopiques à des conditions scotopiques. [Les sensibilités maximales se décalent vers la gauche lorsque l'intensité lumineuse diminue, et nous passons à un maximum de 555nm le jour à 510nm pour la nuit. Ceci est probablement dû à la « modification des contributions relatives des cônes et bâtonnets » (14 p. 119). Concrètement, les rouges s'assombrissent et les bleus s'éclaircissent comme nous pouvons le voir sur la Figure 50.

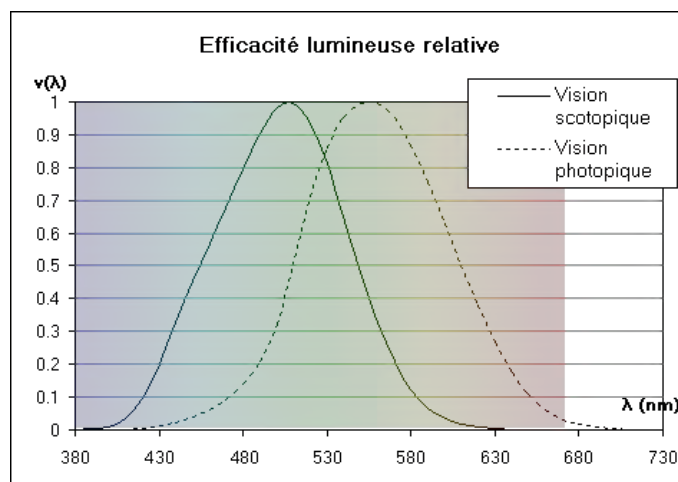


Figure 50 Graphe présentant la sensibilité relative spectrale de l'œil humain en vision photopique et scotopique

Remarque : Ce graphique est issu d'une étude sur un grand nombre d'individus caractéristiques. Les courbes $V(\lambda)$ pour la vision photopique et $V'(\lambda)$ pour la vision scotopique sont admises comme standard par la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage).

Luminosité et mélanges colorés : Loi d'Abney

Le mélange de longueurs d'onde de couleur impacte également sur la luminosité, ce qui est expliqué par la loi empirique d'Abney : « Si deux stimuli de couleurs A et B sont perçus comme ayant la même luminosité, et si deux autres stimuli de couleurs C et D sont également perçus comme ayant la même luminosité, alors les mélanges additifs de A et C, et de B et D seront perçus comme ayant la même luminosité » (31)

Ceci signifie que les spectres lumineux s'ajoutent en énergie lumineuse (luminance). Cette loi ajoute que la sensation globale ressentie lors de la perception d'une lumière est l'intégrale de la courbe énergétique de ce spectre lumineux multiplié par la courbe d'efficacité lumineuse de l'œil, soit la luminance. Cependant, la loi d'Abney semble « approximativement exacte » selon Henry Piéron, psychologue français, professeur en physiologie des sensations, l'un des fondateurs en France de la psychologie scientifique. Effectuant des recherches sur la validité de cette loi, il a montré plusieurs

incohérences notamment lorsqu'il étudia le phénomène de brillance en fonction de la saturation pour des plages colorées (32).

Effet Helmholtz-Kohlrausch

Il s'agit d'un effet qui montre la dépendance de la pureté par rapport à la luminance et à la chromaticité (teinte). «Les objets de couleur apparaissent plus clairs que les objets achromatiques ayant la même luminance. Les couleurs les plus saturées apparaissent les plus brillantes » (33).

VI. VISION DU MOUVEMENT

1. Percevoir un mouvement

Percevoir un mouvement est fondamental pour de nombreuses espèces. Cela nous ramène à une notion de survie qui nécessite vigilance et sécurité. Percevoir un mouvement peut nous permettre de trouver de la nourriture, de détecter un prédateur, ou de reconnaître une entité familière.

« Pour percevoir le mouvement, des circuits neuraux vont convertir le mouvement, complexe au niveau des yeux, en de simples impulsions électriques et potentiels d'action qui, en provenance des circuits détecteurs de mouvements, peuvent transmettre les directions et vitesses du mouvement des objets ou de l'observateur. L'interprétation de processus cérébraux supérieurs et quelques fois cognitifs (basés sur la connaissance) peut être nécessaire pour donner du sens aux mouvements, comme à tout signal sensoriel » (14 p. 127).

Nous comprenons ainsi que la perception d'un mouvement se situe «à la limite de processus liés à la sensation elle-même et de ceux plus complexes de la perception » (20 p. 135).

2. Mécanisme de perception

Percevoir un mouvement est lié à notre champ visuel et ses limites. A la limite de notre champ visuel, un objet stationnaire peut être ignoré et jugé comme non nuisible à notre sécurité. Par contre, la stimulation par un mouvement est détectée par la zone périphérique de la rétine. (14 p. 131) Comme nous l'avons déjà évoqué dans ce chapitre, les cônes situés en périphérie sont sensibles au mouvement.

«La perception de la profondeur de champ, comme celle du déplacement se fait également sur des contrastes de luminances » (13 p. 52)

A la limite de notre champ visuel, nous n'avons donc, pour un objet en mouvement, aucune perception et identification de l'objet. D'ailleurs s'il venait à cesser d'être en mouvement nous l'ignorerions bien vite.

Ce n'est qu'après le réflexe rotatif des yeux que nous allons ramener l'objet instationnaire dans notre vision centrale, soit la région fovéale avec réseau neural central, et pouvoir identifier l'objet.

L'humain est doté d'un système de rotation des yeux, pour lesquels il existe deux sous-systèmes neuraux pour signaler le mouvement : le système « image-rétine » et le système « œil-tête ».

3. Le système « image-rétine »

Il s'agit de la stimulation rétinienne d'un œil stationnaire par des images mobiles.



Figure 51 Système œil-rétine (14 p. 132)

Différents travaux en neurophysiologie réalisés notamment par Horace Barlow, neuroscientifique visuel, et complétés par les travaux de JY. Lettvin ont permis de mettre en évidence l'existence d'un « codage neural spécifique au mouvement, dans la rétine ou dans les aires de projection visuelle du cerveau » (14 p. 133)

Il a été montré que ce sont les cellules ganglionnaires ON/OFF, sensibles à des allumages et extinction de lumière qui sont également responsables des signaux de mouvements.

Voici les différents récepteurs neuronaux pour l'œil humain :

- Ceux qui signalent des variations d'éclairement sont en nombre majoritaire ;
- Ceux qui émettent une réponse à une lumière continue et constante sont en faible nombre ;
- Les récepteurs ON qui émettent un signal quand la lumière est allumée ;
- Les récepteurs OFF qui émettent un signal quand la lumière est éteinte ;
- Les récepteurs ON-OFF qui réagissent à un allumage/extinction de lumière, et qui sont aussi responsables des signaux de mouvement.

Johannes Muller, physiologiste, émit la loi fondamentale dite « loi des Energies Spécifiques », ou « loi des Qualités » : « une fibre nerveuse ne peut signaler qu'un seul type de qualité » ce qui permet ainsi de comprendre que, par exemple, le système visuel a été « modelé par sélection naturelle » afin de répondre à des caractéristiques complexes d'objets de mouvements et de couleur.

4. Le système « œil-tête »

Il s'agit de la poursuite oculaire d'objets en mouvement. Et c'est la rotation des yeux, possible par les muscles du bulbe oculaire, qui va générer la perception du mouvement. En effet, le mouvement de l'œil va être signalé au cerveau et va indiquer un mouvement d'objet extérieur suivi par les yeux.



Figure 52 Système Œil-tête (14 p. 132)

Par saccade oculaire (d'après les études d'Emile Javal et Edwald Hering) les yeux vont très rapidement être amenés en vision centrale pour que l'image d'un objet parvienne sur la fovéa. Pour l'exploration visuelle de notre environnement, notre œil effectue d'incessantes saccades, en moyenne trois par seconde.

5. Différents types de mouvement

Nous distinguons deux types de mouvements : le mouvement réel et le mouvement apparent, qui, selon les cas, peuvent induire des mouvements illusoires.

a. Mouvement réel

Il y a un mouvement réel

- Lorsqu'un objet est en mouvement unique : « domaine du mouvement simple » ;
- Ou lorsqu'il y a défilement d'un réseau : « domaine fréquentiel » (20 p. 136).

Il existe une notion de relativité du mouvement réel. En effet, à chaque mouvement le cerveau doit faire un choix et décider de ce qui bouge ou de ce qui est immobile, et tout mouvement d'objet ne

peut se mesurer que par la référence à un autre objet comme l'indique la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, Physicien théoricien (14 p. 140).

Par exemple, lorsque nous marchons, nous savons que le mouvement est celui de notre corps, et non celui de l'environnement.

Un autre exemple : si un point lumineux est projeté sur un grand écran, alors, lorsque l'écran bouge, nous aurons l'impression que le point lumineux s'est déplacée dans le sens opposé du mouvement de l'écran, et que l'écran est resté à sa place. Il s'agit du mouvement induit, étudié par Karl Duncker (Psychologue allemand spécialisé en « gestalt » (cf. glossaire p208)) qui a montré que dans le cas d'un mouvement relatif d'objet, nous aurons tendance à voir l'objet le plus petit en mouvement (14 p. 148).

Le cas de la lumière mouvante est également un mouvement induit. Il s'agit là d'un mouvement autocinétique pour lequel de nombreuses hypothèses d'explications ont été émises, en vain. Nous obtenons ce phénomène lorsque nous plaçons un petit point lumineux dans un endroit reculé d'une salle noire. Si nous observons ce point lumineux quelques secondes, nous aurons l'impression qu'il se déplace de façon désordonnée dans la pièce.

b. La persistance visuelle

Il y a persistance rétinienne lorsque la rétine est dans l'incapacité de signaler des changements rapides d'intensité. Au-delà d'une certaine fréquence, dite fréquence critique de fusion, la vibration de lumière semblera continue à cause de ce phénomène.

C'est également ce principe qui est utilisé pour la télévision où sont présentées 24 images par secondes en utilisant un obturateur à 3 sections. Au final, la fréquence de vibration est de 72 Hz. (14 p. 152)

c. Mouvement apparent

« Un mouvement apparent est perçu pour des vitesses pour lequel le mouvement réel ne peut plus l'être. » (20 p. 147)

Citons par exemple le phénomène « phi » aussi dit « mouvement phi » qui est utilisé dans le cinéma. Il est basé sur l'expérience suivante : si nous avons deux sources placées à une distance correcte, lorsque nous allumons une source puis l'éteignons pour laisser la seconde s'allumer, nous avons l'impression que le point lumineux s'est déplacé.

CHAPITRE 3

LUMIERE ET SENSIBILITE VISUELLE : Inconfort, gênes visuelles, pathologies

« Le triplet », que nous avons vu précédemment, nous rappelle que trois paramètres sont nécessaires à la perception d'un objet : la source – l'observateur – l'objet. Des paramètres physiques et physiologiques interagissent ainsi entre eux, et, s'ils sont altérés, peuvent occasionner des inconforts ou gênes visuelles dont l'impact sanitaire est variable selon les sensibilités visuelles de chacun. De même, il est important de considérer que l'œil humain vieillit mais aussi qu'il n'est pas toujours parfait et peut présenter des déficiences et pathologies qui affectent aussi la perception visuelle de notre environnement. (Plus de détails en *Annexe 8* sur les troubles visuels)

Ainsi, dans ce chapitre, nous détaillerons dans un premier temps les phénomènes physiques de la lumière induisant des inconforts ou gênes visuelles, relatifs à la sensibilité de l'œil humain. Nous traiterons du phénomène d'éblouissement en rappelant à la fois des lois empiriques, l'approche mathématiques et des abaques pour le quantifier. Ensuite, nous mettrons l'accent sur le phénomène de papillotement de lumière qui fera l'objet des études phénoménologiques du Chapitre IV. Certes le papillotement de lumière peut être corrélé au phénomène d'éblouissement, mais à cela s'ajoute une composante temporelle qui impacte sur le processus visuel et neurologique. Aussi, un rappel des lois empiriques et des principales recherches effectuées sur ce sujet sera présenté.

Enfin, nous aborderons l'impact sanitaire des différents inconforts ou gênes visuelles traités auparavant, ce qui mettra en exergue les dangers du papillotement de lumière qu'il conviendra de limiter.

I- INCONFORT PAR EBLouisSEMENT

1. Différents types d'éblouissements

Les mécanismes d'éblouissement sont assez complexes. L'éblouissement peut être direct lorsque nous regardons une source ou indirect par réflexion. Ceci dit, trois états distincts de gêne visuelle causés par éblouissement se démarquent (21) :

- Eblouissement gênant, mais qui ne nuit pas à la visibilité : ceci impose à l'observateur de détourner son regard de la source éblouissante.
- Eblouissement invalidant : dû à la diffusion de lumière dans les milieux oculaires. Ceci crée un léger voile qui abaisse tout contraste et rend la tâche/l'objet impossible à voir.
- Eblouissement aveuglant : il crée un voile d'éblouissement de luminance qui perdure dans le temps. Il est par exemple généré par des sources de lumière de forte luminance.

2. Sensibilité spectrale de l'œil et éblouissement

Il est important de connaître la sensibilité de l'œil dans les différentes conditions : scotopique, photopique et mésopique, ainsi que les répartitions spectrales des sources utilisées.

Comme l'avons vu précédemment, l'effet Purkinje révèle que la sensibilité spectrale de l'œil varie avec la luminosité (la sensibilité spectrale de l'œil est maximale à 555nm le jour et à 507nm la nuit). Ainsi, une source, par exemple à LED sera perçue différemment de jour ou de nuit.

Rappelons qu'une source LED au phosphore d'ancienne facture présente un phénomène de halo: un faisceau bleu central et une région diffuse jaune périphérique. De nuit, le pic bleu émis par la LED sera plus visible que la lumière jaunâtre dans la périphérie du champ visuel. Ceci peut générer un éblouissement lié à la lumière bleue, encore en cours d'étude.

3. Les contrastes de luminance et dimensionnement de l'éblouissement

Les contrastes de luminance peuvent occasionner, comme vu précédemment, des éblouissements.

Il faut considérer :

- Le rendu des contrastes qui correspond à la proportion dans laquelle les contrastes de luminance sont réduits ou augmentés ;
- La distribution, et l'équilibre des luminances dans le champ de vision.

Ainsi, dans un local, il faudra veiller à :

- limiter les valeurs de luminances au plafond et au sol ;
- bien répartir les luminances dans la zone de tâche visuelle ;
- limiter les éblouissements causés par les luminaires, les fenêtres, etc.

Voici un graphique montrant une échelle de luminances acceptables dans un local :

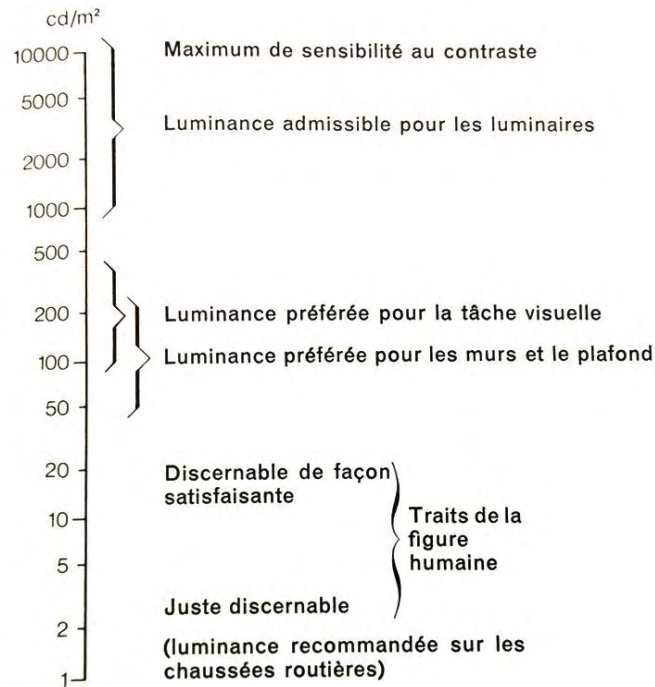


Figure 53 Echelle de luminance présentant des valeurs de luminances acceptables pour l'éclairage intérieur (34)

La Figure 54 présente les valeurs de luminances préférées par les observateurs dans leur zone de tâche visuelle en fonction de la luminance du luminaire :

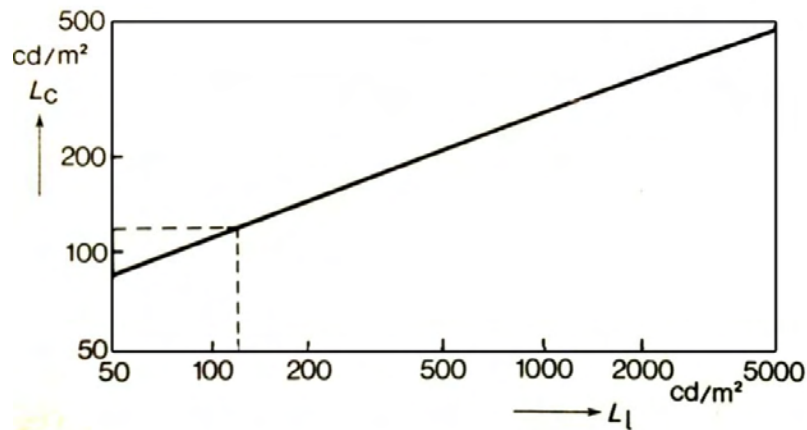


Figure 54 Luminance préférée L_c en fonction de la luminance du luminaire L_l . (34)

4. Abaques sur les facteurs d'éblouissement.

a. Indice de position de Guth

Les travaux de Guth et Luckiesh (35) ont permis de mettre en évidence l'importance de la position d'une source par rapport à un observateur. Ils ont notamment établi l'indice de position de Guth qui permet de déterminer l'influence sur l'éblouissement d'une source lumineuse en fonction de l'axe du regard d'un observateur, considéré horizontal.

Voici l'expression mathématique de l'indice de position de Guth :

$$\frac{1}{p} = \frac{d^2 \exp[-0,18(s^2 / d) + 0,011(s^3 / d)]}{d^2 + 1,5d + 4,6} + 0,12 \left\{ 1 - \exp[-0,18(s^2 / d) + 0,011(s^3 / d)] \right\}$$

p : indice de Guth

d : distance frontale de la source par rapport à l'observateur

s : distance latérale de la source par rapport à l'observateur.

L'abaque graphique (Figure 55) présente l'indice de position de Guth :

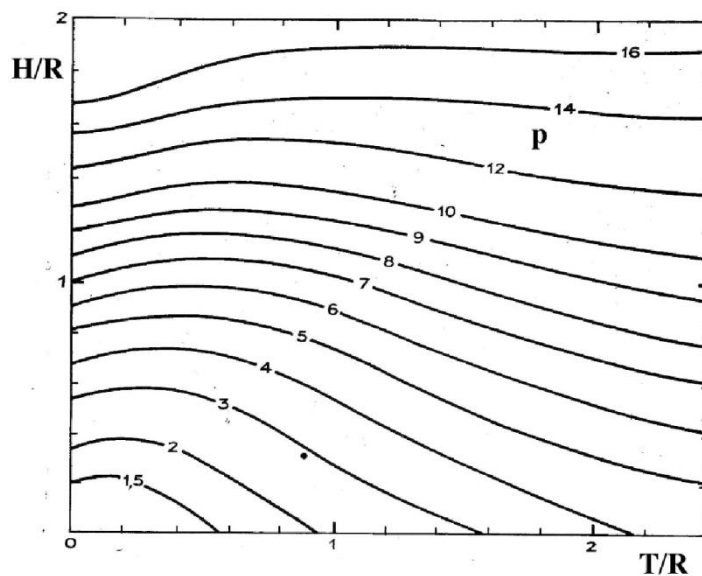


Figure 55 Facteur de position p (indice de Guth) par rapport à l'observateur et à l'axe du regard. La source est à la distance R, à la hauteur H et excentrée à T (13 p. 102)

b. Facteur de Harisson

Selon Harisson, les travaux de Luckieh et Guth, ne considérant que l'influence d'un fond de luminance uniforme, n'est pas suffisant. Il faut également considérer la luminance de l'entourage ou voisinage (13 p. 103)

La formule mathématique définissant l'éblouissement par Harisson G est :

$$G = 10^{-9} \left(\frac{SL_s q}{H^2 f} \right)$$

S : distance latérale de la source par rapport à l'observateur.
L_s : luminance de la source (supposée supérieure à la luminance de voisinage L_v)
H : hauteur du luminaire
q : facteur de position
f : influence de l'entourage

c. Loi de Weber & diagramme de Blackwell

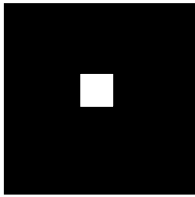
Comme nous l'avons évoqué précédemment, les travaux psychophysiques de M. Weber ont consisté en la théorisation de la relation esprit-matière. Pour cela, il a étudié le lien entre un stimulus et sa sensation induite, et l'a énoncé sous forme quantitative :

La sensation varie comme le logarithme de l'excitation : $S = K \cdot \log(I)$

S : sensibilité
K : constante
I : intensité du stimulus

(C'est M. Fechner, en hommage à Weber qui énonça sa loi comme étant la loi de Weber, souvent dite Weber-Fechner.)

Aussi, à l'issue des travaux de Weber-Fechner, ont été établis une définition du contraste de luminance et un abaque de seuil de contraste de luminance en fonction de la luminance de fond.



Prenons par exemple un objet :

un carré noir dans lequel se trouve un petit carré blanc.

La luminance de fond L_f correspond à la zone noire et la luminance de détail L_d au petit carré blanc.

Nous définissons le contraste de luminance de Weber-Fechner C_w par :

$$C_w = \frac{(L_d - L_f)}{L_f}$$

C_w : contraste de Weber-Fechner (peut être positif ou négatif)

L_f : luminance de fond

L_d : luminance de détail

Nous définissons le contraste seuil de perception en fonction de la luminance de fond, dans différentes conditions lumineuses (scotopique, mésopique et photopique), et pour des détails plus ou moins grands dans la Figure 56.

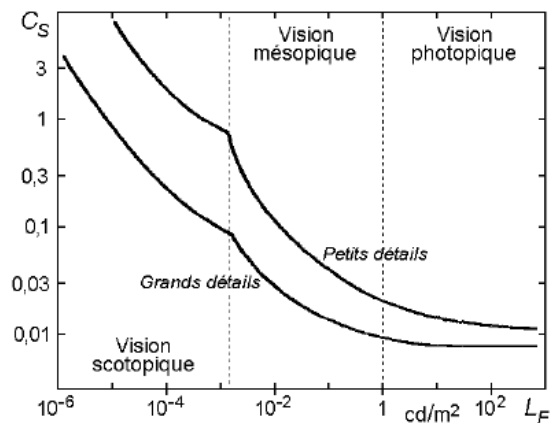


Figure 56 Contraste seuil en fonction de la luminance de fond (36)

A l'issue de la définition des contrastes de luminances de Weber Fechner, l'abaque de Blackwell a été mise en place. Elle permet de définir le niveau de visibilité en fonction du module du contraste $|C_w|$ (ou $|C|$) et de la luminance de fond. (Plus le niveau de visibilité est élevé, meilleure est la visibilité).

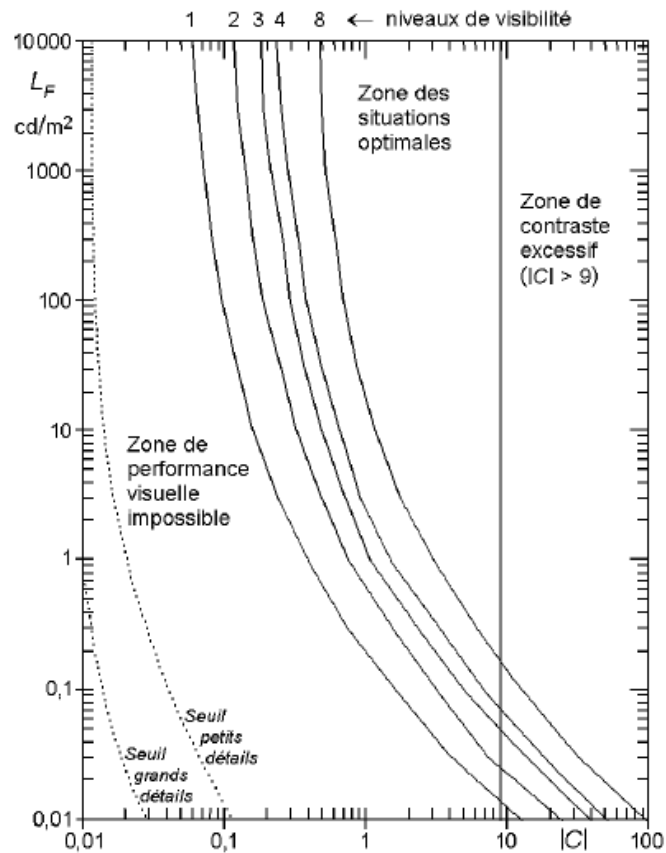


Figure 57 Diagramme de Blackwell pour des tâches visuelles courantes (34)

d. Travaux de Hopkinson comparés aux travaux de Söllner sur l'éblouissement d'inconfort

Les facteurs majeurs ayant une influence sur la création d'un éblouissement sont la luminance, la taille, le nombre et la position du luminaire. L'effet d'ambiance va également impacter ainsi que l'effet d'adaptation à un éblouissement pour lesquels les résultats restent encore mitigés.

En effet, selon les pays, les résultats divergent lorsque nous considérons l'incidence des luminaires. Dans la méthode anglaise, issue de l'étude de Hopkinson, si le nombre de luminaire augmente ou la taille du luminaire augmente, l'effet d'adaptation est plus grand que l'effet direct d'éblouissement, ainsi, l'éblouissement diminue. Or, dans les travaux de Söllner, pour la même expérience, c'est une augmentation de l'éblouissement qui en découle.

Il est alors difficile pour la CIE d'unifier la méthode de calcul de l'éblouissement (13 p. 103), et une échelle de correspondance entre les deux indices DGR de Guth et G de Söllner a été mise en place.

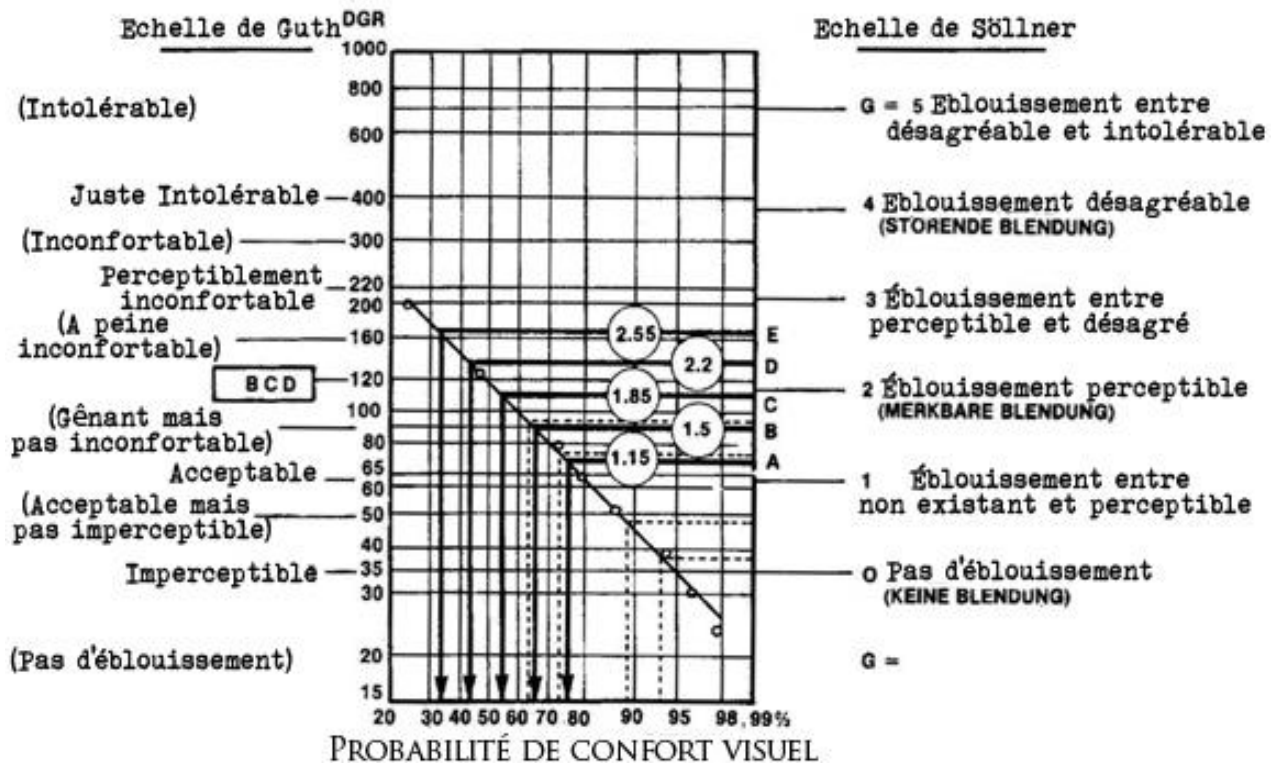


Figure 58 Correspondance des significations des indices DGR (Guth) et G (Söllner). (13 p. 106)

e. **Abaque Bodman et Söllner et classe d'éblouissement de Söllner et Fisher**

➤ **Abaque Bodman et Söllner**

L'abaque de Bodman et Söllner donne une indication sur la classe d'éblouissement du luminaire et ses courbes limites sans émission latérale, en précisant les luminances à ne pas dépasser en fonction de l'éclairement horizontal et l'angle créé avec le regard de l'observateur. (13 p. 106)

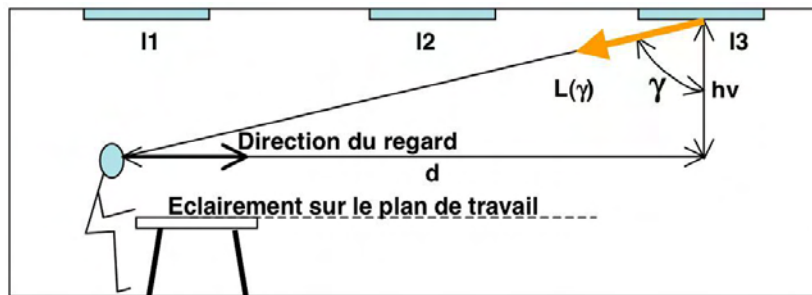


Figure 59 Position du regard de l'observateur par rapport à une source de lumière créant un éclairage horizontal

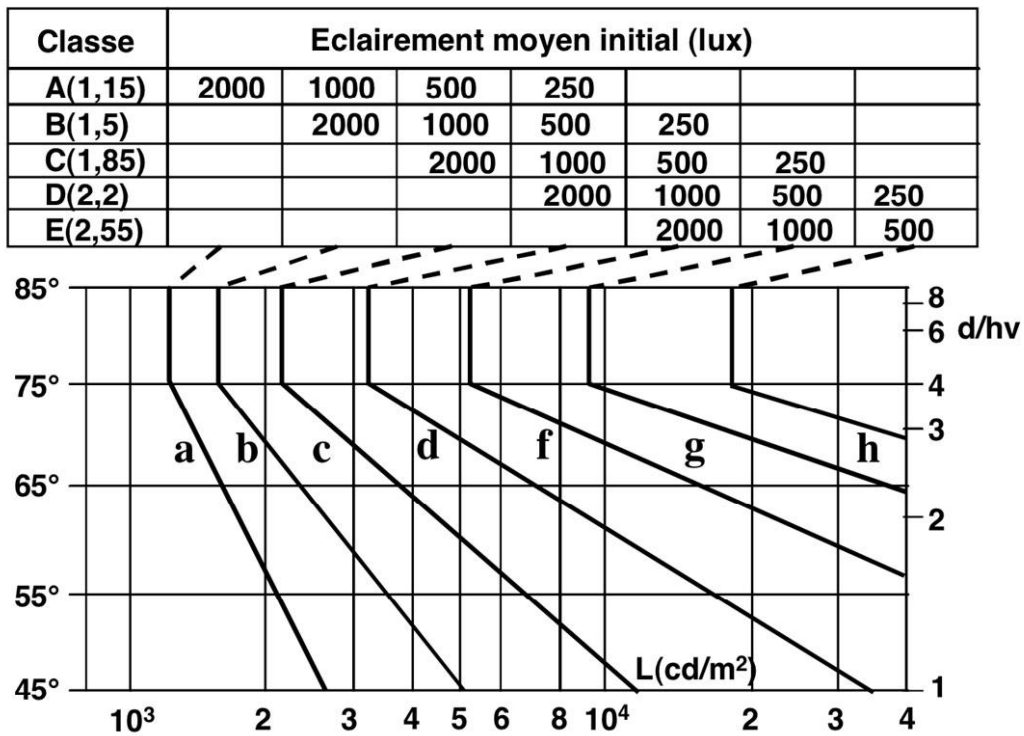


Figure 60 Courbe de luminances limites et éclairage horizontal selon Bodman et Söllner, avec en abscisse la luminance perçue (échelle log) dépendant de l'angle γ (en degré) en ordonnée.

| Classe (indice G) | Eblouissement | Types de tâches visuelles |
|-------------------|---------------------------|--|
| A(1,15) | négligeable à perceptible | Tâches visuelles très exigeantes |
| B(1,5) | perceptible à léger | Tâches visuelles exigeantes |
| C(1,85) | léger à notable | Tâche visuelles à exigences modérées |
| D(2,2) | notable | Tâches visuelles simples |
| E(2,55) | notable à désagréable | Pas de postes fixes, faibles exigences visuelles |

Figure 61 Classes d'éblouissement selon Söllner-Fischer (13 p. 106)

f. Paramètres utilisés en éclairage intérieur en France pour quantifier l'éblouissement

Eclairage intérieur

Formule de calcul de l'UGR (Unified Glare Ratio):

$$\text{UGR} = 8 \log \frac{0,25}{L_b} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2 \omega}{p^2}$$

(Sensibilité logarithmique) (Luminance de la source) (Angle solide) (Luminance de fond) (Facteur de Guth)

Avec :

- L_b : la luminance de fond exprimée en cd/m^2 (représente l'éclairement vertical indirect au niveau de l'œil de l'observateur, exemple : un mur).
- L_i : la luminance contenant les parties lumineuses de chaque luminaire dans la direction de l'observateur en cd/m^2 .
- ω : angle solide (en stéradian) des parties lumineuses de chaque luminaire au niveau de l'œil de l'observateur.
- p : indice de position de Guth fourni dans des tables spécifiques. Il représente la position d'un luminaire par rapport à l'axe vertical.
 $p = 1$ quand le luminaire est dans la direction du regard (de la tâche),
 $p = 10,9$ à 53° au-dessus du regard

Le facteur de Guth (p) est le paramètre qui tient compte de la position relative source-observateur. Cette expression est relativement simple à comprendre : l'éblouissement est proportionnel au contraste entre la (ou les) source (s), et celle du fond. Il dépend de la surface relative de la (des) source(s) et de la position de cette source par rapport à notre axe de vision. Les facteurs 8 et 0,25 résultent de l'expérimentation.

De façon globale, si l'UGR est inférieur à 10 alors l'éblouissement sera imperceptible, s'il est supérieur à 30, l'éblouissement sera inacceptable. Selon le type de local, la valeur tolérable de l'UGR sera différente. (Cf. la norme d'éclairage NF EN 12464-1).

II- INCONFORT VISUEL PAR PAPILOTTEMENT DE LUMIERE

Le phénomène de scintillement des sources de lumière est connu depuis l'introduction de l'alimentation en réseaux électriques. De part l'évolution croissante d'équipements techniques d'éclairage, le phénomène qui était marginalisé est maintenant reconnu comme un effet gênant. Aussi, de nombreuses recherches ont été menées sur le phénomène. (37)

1. Perception visuelle instationnaire (spatial et temporel)

Lorsque l'on perçoit une scène visuelle, les premiers stades du traitement correspondent à une représentation spatiale de l'environnement par projection sur la rétine. S'ensuivent des traitements neuraux analysant la forme, le mouvement, la couleur, etc. (14 p. 97)

Certaines expériences ont consisté en la distinction des composantes temporelles et fréquentielles pour certaines longueurs d'onde. A ce titre, il est important de ne pas confondre le domaine spatial et temporel, dont voici un petit rappel.

Domaine spatial :

- Dans le cas d'une image d'un côté noir de l'autre blanc, nous parlons de contraste de luminance spatial.
- Dans le cas de deux couleurs côte à côte : le contraste de luminance spatial existe toujours, mais il existe également un contraste chromatique spatial.

Domaine temporel :

- Dans le cas de deux stimuli successifs de lumière blanche, nous parlons de contraste de luminance temporel.
- Dans le cas de deux stimuli successifs colorés, le contraste de luminance temporel existe toujours, mais il existe également un contraste chromatique temporel.

2. Quantification du papillotement de la lumière

a. Contraste temporel d'une longueur d'onde

Le papillotement de la lumière est un changement rapide et répété dans le temps de la luminance ou de la chromaticité. Dit autrement, il s'agit d'un contraste temporel. Ce contraste peut être irrégulier ou régulier auquel cas il existe une fréquence de vibration.

Remarque : plusieurs terminologies sont équivalentes au terme « papillotement de la lumière » : flickering / scintillement / vibration de la lumière / contrastes temporel d'une lumière / modulation de la lumière / contraste successif de luminance ou couleur.

b. Le taux de modulation et le « flicker index »

Les contrastes de luminance induits sont à corrélérer à la modulation en amplitude du signal lumineux. Il existe deux définitions, celle du taux de modulation, mais également du « flicker index » qui vont donner des informations différentes sur le signal (38).

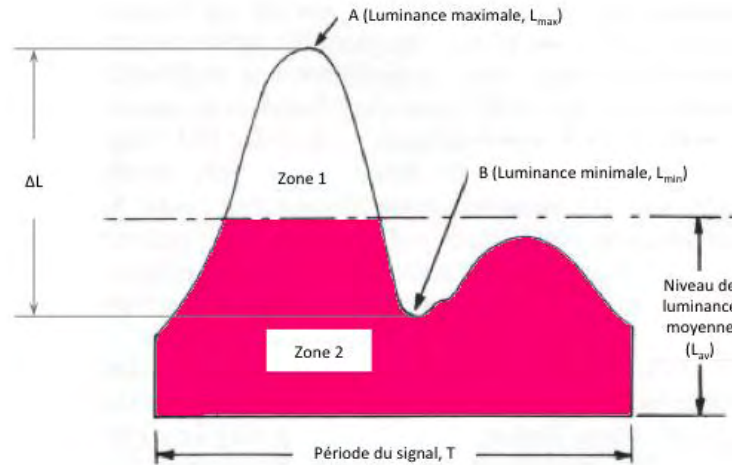


Figure 62 Signal aidant au calcul du taux de modulation et du papillotement de la lumière. (39) (40)

Taux de modulation

Le taux de modulation s'exprime en pourcentage. On le trouve défini sous d'autres noms : le contraste de Michelson, ou contraste crête à crête, ou profondeur de modulation. Il est compris entre 0 et 1.

$$\tau = 100 \times \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

τ : taux de modulation (%)

L_{max} : luminance maximale (en A sur le graphique) en cd/m²

L_{min} : luminance minimale (en B sur le graphique) en cd/m²

Si τ=0% cela signifie que le signal est continu et qu'il n'y a aucune variation de la luminance.

Si τ=100% cela signifie que la modulation est maximale

Nous pouvons trouver, moins fréquemment, une définition similaire du taux de modulation, τ' , comme suit :

$$\tau' = 100 \times \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{moy}}$$

τ' : taux de modulation modifié (%)

L_{max} : luminance maximale (en A sur le graphique) en cd/m^2

L_{min} : luminance minimale (en B sur le graphique) en cd/m^2

L_{moy} : luminance moyenne (en C sur le graphique) en cd/m^2

Ces deux définitions sont mieux adaptées dans les cas de variations périodiques de la luminance.

Remarque : Il ne faut pas confondre le contraste de Michelson qui définit un contraste temporel et le contraste de Weber-Fechner qui définit un contraste spatial.

Flicker index

L'index du papillotement de la lumière Fi correspond au rapport des aires du signal au-dessus et au-dessous de la valeur moyenne.

$$Fi = \frac{\text{Aire Zone 1}}{(\text{Aire Zone 1} + \text{Aire Zone 2})}$$

Le « flicker index », varie entre 0 et 1, et la valeur zéro correspond au mode continu.

c. La Fréquence Critique de Fusion (FFC) : limite de la perception consciente du papillotement de la lumière

Le papillotement de la lumière peut être perçu de manière consciente ou inconsciente. Pour chaque individu, il existe une limite de perception consciente du papillotement de la lumière caractérisée par la Fréquence Critique de Fusion (FFC). Dit autrement, la FFC correspond à un point de transition où la lumière intermittente cesse d'être perçue comme continue. (41)

d. Perception inconsciente du papillotement de la lumière révélée par électrorétinogrammes (ERG)

Au-delà de la valeur du seuil critique (FFC), c'est la perception inconsciente qui prendra le relais. Les mesures par électrorétinogrammes ont indiqué que la modulation de fréquence de la lumière sur une gamme de 100-160Hz est résolue par la rétine humaine même si le papillotement de la lumière est trop rapide pour être vu (42) et elle peut même aller jusqu'à une fréquence de 200Hz (43) (44)

e. Le papillotement de la lumière et les sources de lumière

| Lampe | Type | Pourcentage de papillotement | Puissance/W |
|---------------|----------|------------------------------|-------------|
| 1 | Halogène | 0.143 | 43 |
| 2 | Halogène | 0.0347 | 30 |
| 3 | Halogène | 0.103 | 105 |
| 4 | LBC | 0.07 | 11 |
| 5 | LBC | 0.11 | 15 |
| 6 | LBC | 0.142 | 7 |
| 7 | LBC | 0.0888 | 11 |
| 8 | LBC | 0.099 | 15 |
| 9 | LBC | 0.096 | 15 |
| 10 | LED | 0.361 | 12 |
| 11 | LED | 0.067 | 8.8 |
| 12 | LED | pas de papillotement | 12 |
| 13 | LED | pas de papillotement | 7 |
| 14 | LED | pas de papillotement | 7 |
| 15 | LED | 1 | 1 |
| 16 | LED | pas de papillotement | 4 |
| 17 | LED | 0.864 | 2 |
| 18 | LED | 0.0837 | 7 |
| 19 | LED | 0.245 | 23 |
| 20 | LED | 0.176 | 20 |
| 21 | LED | pas de papillotement | 5.4 |
| 22 | LED | pas de papillotement | 6 |
| 23 | LED | pas de papillotement | 6 |
| 24 | LED | pas de papillotement | 6 |
| 25 | LED | 0.857 | 1.8 |
| 26 | LED | pas de papillotement | 2 |
| 27 | LED | pas de papillotement | 3 |
| 28 | LED | 0.932 | 3 |
| 230 V / 50 Hz | | | |

Figure 63 Etudes du papillotement de la lumière de plusieurs sources (68)
[LBC : Lampe Basse Consommation]

La fréquence de l'alimentation électrique du courant alternatif est de 60Hz en Amérique et de 50Hz en Europe, et à la fois 50Hz et 60Hz sont utilisés dans différentes régions du Japon.

Le circuit dans les vieilles lampes fluorescentes avec ballasts magnétiques fonctionne de telle manière que la source vibre à deux fois la fréquence d'alimentation (100Hz ou 120Hz). Il a été déterminé que les crises photosensibles n'auraient pas lieu de se produire si les lampes fluorescentes fonctionnaient correctement.

Certains mauvais fonctionnements des lampes créent un papillotement de la lumière en-dessous de 70Hz. Et, à cette fréquence, les enregistrements électro-encéphalographiques (EEG) présentent des caractéristiques pouvant engendrer des convulsions chez des patients à risques. Néanmoins, certains patients photosensibles se plaignent aussi à des fonctionnements normaux d'un éclairage fluorescent (avec ballasts magnétiques). (44)

Le tableau ci-contre présente des mesures de papillotement de la lumière réalisées par notre équipe au laboratoire LAPLACE pour des lampes halogènes, fluorescentes et à LED. Elles montrent que les taux de modulation du papillotement de la lumière sont variés ou inexistant pour certaines LEDs.

Les gradateurs de lampes sont également soupçonnés de jouer un rôle dans l'augmentation du nombre de plaintes au papillotement de la lumière. Par exemple, l'utilisation de gradateurs à incandescence dans les maisons augmente considérablement la sensibilité de la lampe aux variations de tension.

3. Processus visuel et neurologique

a. Intégration temporelle

Dans le domaine spatial, la discrimination de deux signaux lumineux espacés nécessite un réseau de détecteurs appropriés pour les discriminer (réponse ON/OFF des récepteurs ganglionnaires).

Il en est de même pour le domaine temporel, qui semble fonctionner sur le même principe. Une intégration temporelle adaptée sera réalisée par les photorécepteurs. On distingue ainsi deux types de réponses :

- Celle des bâtonnets pour lesquels la période d'intégration est de 100 ms.
- Celle des cônes, avec un temps d'intégration de 10 à 15 ms.

Selon les conditions lumineuses, le temps d'intégration nécessaire va être variable :

- en condition scotopique (réponse des bâtonnets) un long temps d'intégration est nécessaire pour atteindre le seuil de résolution temporelle.
- en condition photopique (réponse des cônes), un court temps d'intégration va améliorer la résolution temporelle.

Selon la fréquence de papillotement de lumière, le temps d'intégration des photorécepteurs va influencer sur la perception du phénomène qui paraîtra continu au-delà de la FFC.

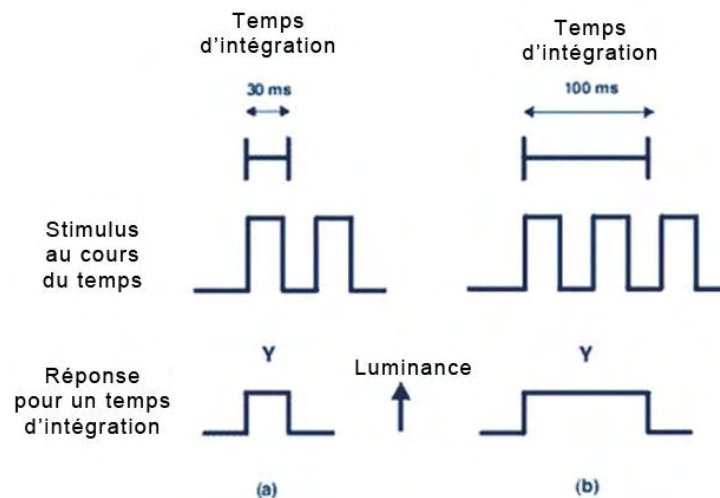


Figure 64 Expérience où des flashes de lumière sont présentés à l'œil. (a) Avec un court temps d'intégration (30ms) : les flashes sont détectés. (b) avec un long temps d'intégration (100ms) : les flashes ne sont pas perçus et le stimulus est apparu brillant (41)

b. Sommation temporelle et loi de Bloch

Vu de façon macroscopique et sans différenciation entre les deux types de photorécepteurs, l'intégration temporelle est corrélée à la « sommation temporelle » de l'œil. La sommation temporelle renvoie à la capacité de l'œil à sommer les effets de quanta de lumière individuels au fil du temps. Par contre, elle ne se produit que dans un certain laps de temps, appelé la durée critique ou période critique T_c . (41)

Loi de Bloch

La loi de Bloch nous indique que la quantité de lumière d'un stimulus bref reçue par la rétine ne sera perçue qu'à partir d'une valeur k .

k est une constante dépendant de la luminance du stimulus L et de son temps d'émission t . Ainsi si la luminance est réduite de moitié, un doublement de la durée du stimulus est nécessaire pour maintenir la même quantité k .

Mais cette loi présente la limite de sommation temporelle, et la durée du stimulus ne doit pas dépasser T_c . Au-delà de la durée critique, le seuil ne dépendra que de la luminance plutôt que du produit de la luminance et de la durée.

$$k = L \cdot t$$

k : constante

L : luminance du stimulus en cd/m^2

t : durée du stimulus en secondes avec $t < T_c$ (T_c est la « période critique »)

c. Résolution temporelle

La notion de « résolution temporelle » du stimulus est primordiale pour la compréhension de la perception du papillotement de lumière. Par définition, la résolution temporelle est la « durée minimale entre deux événements pouvant être séparés par un détecteur donné » (Ferry-Mich. 1981). » (45).

Expériences de Berman

Berman a travaillé sur la perception visuelle du papillotement de la lumière à haute fréquence. Pour cela, il a mesuré l'activité électrique de la rétine avec des électrodes rattachées aux yeux. Il a ainsi montré que jusqu'à 100 Hz il obtenait encore des réponses. Il en a donc conclu que les cellules de la rétine résolvent les hautes fréquences.

Brindley

Brindley, en 1962, démontra par la psychophysique que le système nerveux résout les stimuli lumineux intermittents à des fréquences bien au dessus du seuil de fréquence de fusion critique. Il a

stimulé électriquement la rétine de telle sorte à produire des phosphènes. En augmentant suffisamment la fréquence électrique, les phosphènes apparaissaient continus.

Il a également combiné la stimulation électrique à hautes fréquences avec la stimulation visuelle par papillotement de la lumière à haute fréquence. A même haute fréquence pour les deux stimulations, les phosphènes et le papillotement de la lumière ont été vus de manière continue. Par contre, lorsque les deux stimulations sont combinées avec des fréquences quelque peu différentes, les observateurs ont dit avoir vu la vibration. Cette vibration était perceptible lorsque les stimulations visuelles avaient une fréquence aussi élevée que 125 Hz, ceci indiquant qu'à un certain niveau, le système visuel résout la stimulation lumineuse à cette fréquence. (46)

Eysel et Burandt

Ces auteurs sont partis de l'hypothèse que les fluctuations de lumière souvent observées avec des lampes fluorescentes affectent l'activité subcorticale dans le cerveau.

Eysel et Burandt, en 1984, ont fait des études sur les chats et ont comparé la réponse d'un stimulus lumineux fluctuant (source fluorescente), et d'un stimulus continu (lumière du jour). Ils en ont conclu que les neurones dans le tractus optique (voie neuronale des yeux) et que le nucleus genouillé latéral du thalamus (une aire visuelle subcorticale) répondaient 2 fois plus sous éclairement vibrant que sous lumière continue. Quelques cellules répondaient à chaque flash issu de la source fluorescente, tandis que certaines répondaient moins fréquemment, mais, la réponse de toutes les cellules a été en phase stricte avec la pulsation de lumière : toutes les cellules ont tendance à répondre juste avant que la lumière n'atteigne son pic. Cette configuration a eu lieu alors que la source fluorescente pulsait à 100 ou 120 Hz. Ces résultats sont importants puisque ces fréquences sont directement corrélées aux fréquences du secteur électrique : 50 Hz ou 60 Hz selon les pays.

Ils ont également remarqué que la luminance ne semble pas impacter sur la réponse des cellules au-delà d'un facteur 10, ce qui est considéré comme faible dans ce type d'expériences.

De plus, ils ont mis en évidence que la structure visuelle du colliculus supérieur (permettant le contrôle du mouvement de l'œil) pouvait interférer à haute fréquence dans la perception visuelle du papillotement de la lumière.

Par contre, ils n'ont pas enregistré la réponse des cellules du cortex visuel, car ils pensaient qu'elles ne répondraient pas au-delà d'un papillotement de la lumière de 20 Hz. Cependant, comme ces études n'ont pas été menées sur des primates, les résultats ne peuvent pas être transposés sur la vision humaine. (46)

4. Papillotement de la lumière et sensibilité visuelle

a. D.H.Kelly : perception du papillotement de la lumière par variation de fréquence et d'intensité lumineuse

Les facteurs qui semblent avoir été les plus étudiés sont la fréquence et la quantité de modulation. Les données de D.H Kelly ont montré qu'au-delà de 100 Hz, pour différentes luminances du stimulus (0,03 à 5000 cd/m²), même avec une modulation de 100%, que le papillotement de lumière est difficile à percevoir directement, que ce soit au niveau central ou périphérique. (47) (48) (49)

Remarque : il est intéressant de noter que « le scintillement invisible est plus susceptible de causer des problèmes lorsque la tâche visuelle exige un positionnement précis des yeux, comme lors de la lecture. » (50)

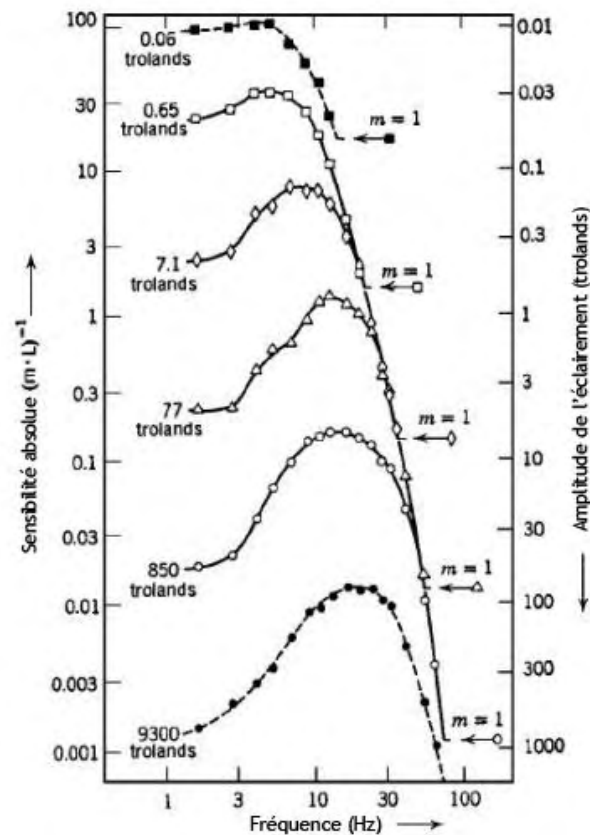


Figure 65 Travaux de Kelly de 1931 présentant la sensibilité au papillotement de la lumière pour différents niveaux d'éclairements moyens rétinien (en Troland). Un objectif de 60° avec des contours flous a été utilisé (sur les axes des ordonnées, la sensibilité absolue est l'inverse de l'amplitude de l'éclairement)(51).

b. Sensibilité au contraste temporel en fonction de la fréquence

Dans cette expérience, la source lumineuse est un signal sinusoïdal. Les observateurs ont pour consigne d'ajuster le contraste de Michelson (ou taux de modulation) au seuil de perception des fluctuations, ceci pour chaque fréquence. Ainsi, « on obtient une courbe des variations du contraste juste perceptible en fonction de la fréquence » (20 p. 130). Plus la luminance indiquée sur le graphique est élevée et plus l'éclairement rétinien le sera aussi. La sensibilité au contraste augmente avec l'éclairement rétinien, et le pic est d'autant plus grand que l'éclairement rétinien est élevé.

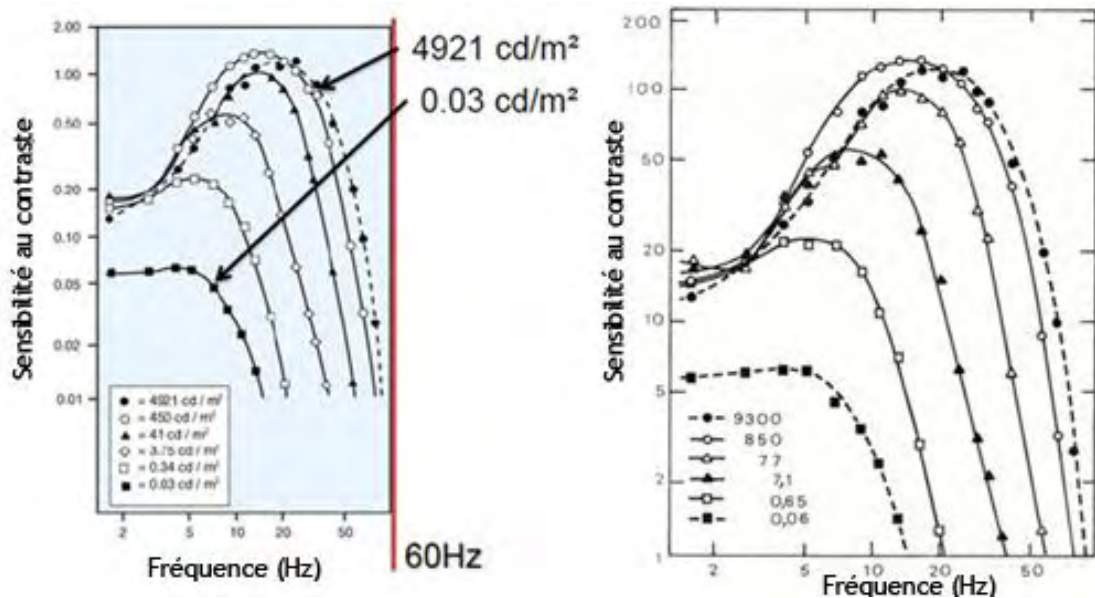


Figure 66 Courbes de sensibilité au contraste temporel en fonction de la fréquence du signal - par Kelly, aussi dites courbes de De Lange. A gauche avec indication des luminances en cd/m^2 (4), à droite avec indication de l'éclairement rétinien en Troland (10 p. 131)

c. Papillotement de la lumière et FFC

Une des méthodes pour déterminer la FFC

Comme déjà expliqué précédemment, il peut y avoir de grandes différences individuelles de sensibilité au scintillement, et les réponses dites normales pour les personnes observant le papillotement de la lumière sont mesurées en utilisant la fréquence critique de fusion (FFC).

Dans cette expérience, quatre diodes électroluminescentes sont disposées sur une surface de 1cm^2 , et organisées dans la fixation fovéale à une distance de 1m. Les seuils des personnes sont déterminés par la méthode psychophysique des limites sur quatre gammes ascendantes (papillotement de la lumière vers la fusion) et quatre gammes descendantes (fusion au scintillement). La moyenne de ces quatre présentations ascendantes et descendantes donne la fréquence de seuil en Hertz. Et le papillotement de la lumière est donc le plus faible niveau de vibration continu qui est perçu comme une source stable de lumière.

Il a été trouvé dans les études (52) (53) que le papillotement de la lumière pour des fréquences de l'ordre de 120Hz ou 150Hz peut ajouter du bruit supplémentaire à l'activité neuronale bien qu'à ces fréquences le papillotement de la lumière ne soit pas détecté consciemment.

Dans une étude réalisée par Küller et al. (52), ce bruit supplémentaire a donné lieu à plus d'ondes alpha dans le cerveau (mesuré par électroencéphalogramme (EEG)). Ceci est signe de fatigue et il a été mesuré plus d'erreurs dans une tâche de travail. Un mécanisme similaire pourrait être considéré dans les basses fréquences comme l'étude d'Hermann le suggère. (54)

FFC et éclairage rétinien pour différentes excentricités

Dans cette expérience, sont étudiés les effets de la zone ou surface rétinienne stimulée. Les stimuli ont différentes fréquences et intensités lumineuses. Le stimulus a un champ de 2° et les excentricités sont indiquées au-dessus des courbes.

Lorsque le stimulus est central (0° d'excentricité), la courbe est lisse. A partir du moment où l'on s'éloigne de la zone fovéale, la courbe présente deux parties. A 5°, une proportion de bâtonnets est présente sur la rétine, aussi on attribue la première partie de faibles luminances aux bâtonnets et la seconde partie en haute luminance aux cônes. A 15° d'excentricité, même remarque, et comme les cônes sont bien plus rares à cette excentricité, la courbe en haute luminance est plus aplatie.

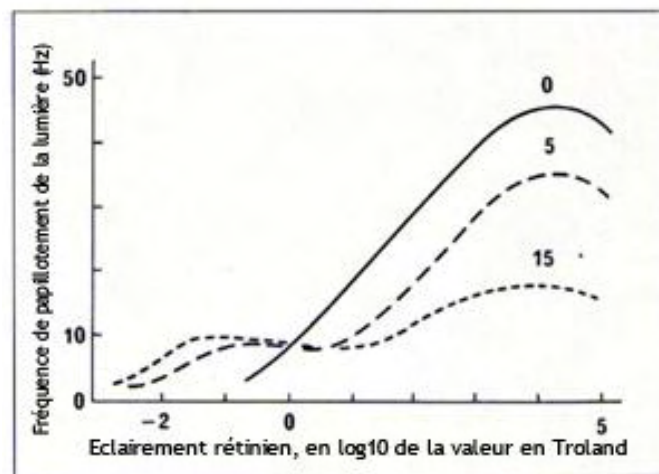


Figure 67 FFC et éclairage rétinien à différentes excentricités du stimulus (20 p. 133) - Pupille artificielle de 1,8 mm.

FFC et éclairage rétinien pour des stimuli centrés mais d'étendue variable

Dans cette expérience, le stimulus est toujours central mais son diamètre est de plus en plus important. Nous constatons que la FFC dépasse rarement les 60 Hz, même pour une large aire de visualisation avec une modulation à 100%, pour une haute luminance. (39)

« La courbe fovéale est pure pour des étendues de stimulus entre 0,3° et 2°. A partir de 6°, et jusqu'à 19°, il y a une cassure, et le premier segment est dû à la réponse des bâtonnets. De façon générale, le papillotement de la lumière aux basses luminances sera mieux détecté à la périphérie que dans la fovéa. » (20 p. 133)

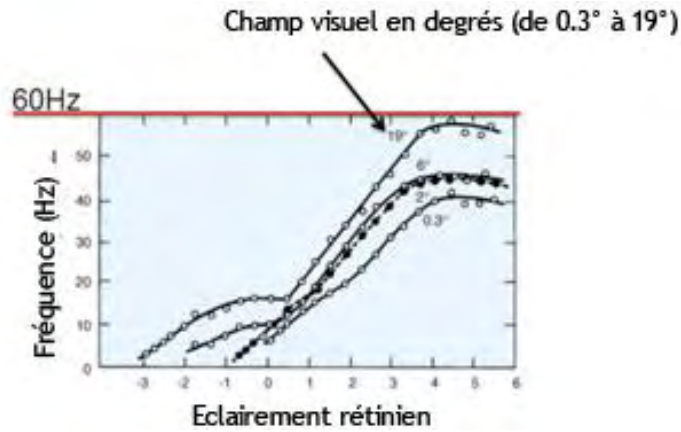


Figure 68 FFC et éclairement rétinien pour des stimuli centrés d'étendue variable.-pupille artificielle de 1,8 mm.

FFC, étendue de la source et luminance de fond

Les travaux de Kelly présentent la sensibilité au papillotement de la lumière en fonction de la taille du stimulus lumineux et du fond derrière le stimulus.

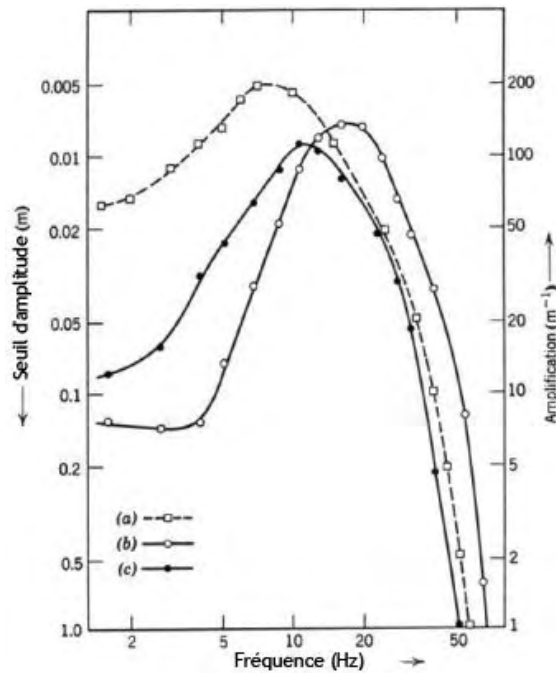


Figure 69 Sensibilité au papillotement de la lumière pour différents niveaux de taille d'une cible scintillante (seuil d'amplitude = modulation) : (a) cible lumineuse scintillante de 2° avec fond lumineux stable, b) cible lumineuse scintillante de 65°, c) cible lumineuse scintillante de 4° avec fond noir (51)

Loi Granit Harper

La loi Granit-Harper dit que le FFC augmente linéairement avec le logarithme de l'aire du stimulus. De manière simplifiée, cela signifie que le système visuel a une meilleure sensibilité temporelle pour les larges cibles (courbe bleue) et une plus grande FFC. (55)

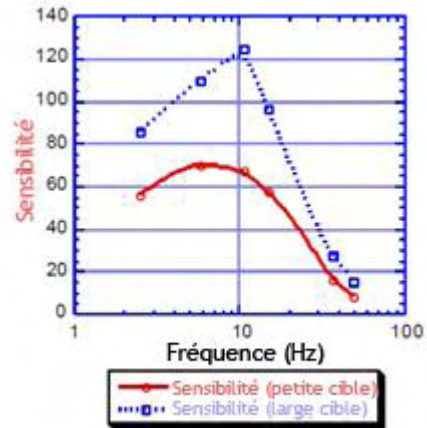


Figure 70 Sensibilité visuelle du papillotement de lumière pour un large diamètre de stimulus (courbe bleue), et un petit diamètre (courbe rouge) (55)

FFC et éclairement rétinien pour différentes longueurs d'ondes (papillotement chromatique)

Cette expérience est réalisée par un stimulus central large dont la longueur d'onde va varier. Nous constatons que les courbes présentent deux parties distinctes. Aux luminances élevées, toutes les courbes de toutes les couleurs se situent sur la même courbe. Par contre, lorsque les luminances sont faibles, nous distinguons des différences selon les longueurs d'ondes créant un faisceau de courbes : « les courbes s'allongent d'autant plus vers les basses luminances que la longueur d'onde est petite » (20 p. 134).

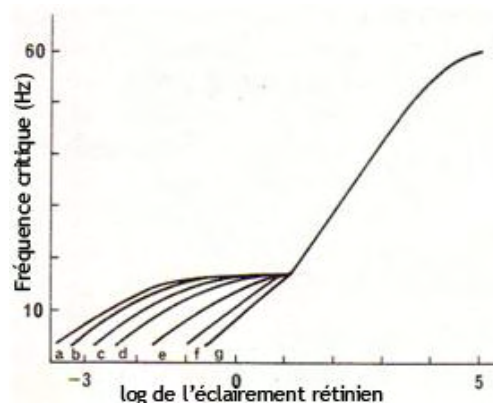


Figure 71 FFC et éclairement rétinien, stimulus de différentes longueurs d'onde- stimulus de 19° entouré d'une plage de 35°. Couleurs en nm : a- 450 ; b- 490 ; c- 535 ; d- 575 ; e- 605 ; f-625 ; g- 670 - Abscisse : log de l'éclairement rétinien, à corrélérer avec la luminance induite par le stimulus, vu qu'il y a une pupille artificielle de 1,8 mm. (19 p. 134)

Remarques :

- « il n'est pas entièrement prouvé que ce faisceau de courbes soit entièrement attribuable aux bâtonnets » (20 p. 134)
- En condition photopique (cf. la partie des courbes attribuable aux cônes), la FFC semble proportionnelle au logarithme décimal de l'éclairement rétinien, ce qui correspond à la loi de Ferry Porter.
- Dans la rétine centrale, où la résolution spatiale est optimale, la résolution temporelle d'un observateur typique est limitée à une fréquence de scintillement critique de 50Hz pour le papillotement de la lumière de luminance et 25 Hz pour le papillotement chromatique. (50) (56) (57) (58)

Loi de Ferry-Porter : FFC et éclairement rétinien

Il a été remarqué, dans le domaine photopique où interviennent les cônes, que la FFC augmente linéairement avec le logarithme de l'éclairement rétinien L. (20 p. 132)

$$FFC = a \log(L) + b \quad \text{avec } a \text{ et } b : \text{ constantes.}$$

Avec une observation fovéale, cette relation est valable sur une large plage de 0,5 à 10000 Trolands.

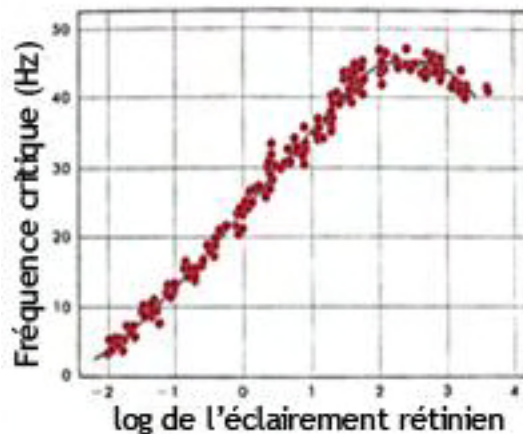


Figure 72 FFC en fonction de l'éclairement rétinien, démontrant la linéarité de la loi Ferry-Porter.

La perception du papillotement de la lumière augmente avec l'intensité du stimulus de test.

Remarque : d'un point de vue pratique, si le stimulus est vibrant, comme un écran d'ordinateur, en diminuant le niveau d'intensité nous allons diminuer voire éliminer la perception consciente du papillotement de la lumière.

d. Papillotement de la lumière et brillance

Effet Brücke-Barkley

Une lumière vibrant à 10 Hz, soit en dessous de la FFC, peut paraître plus brillante (perception II sur le graphique) que cette même lumière qui ne vibre pas (0Hz donc mode continu, perception I sur le graphique). Il s'agit de l'effet Brücke-Bartley.

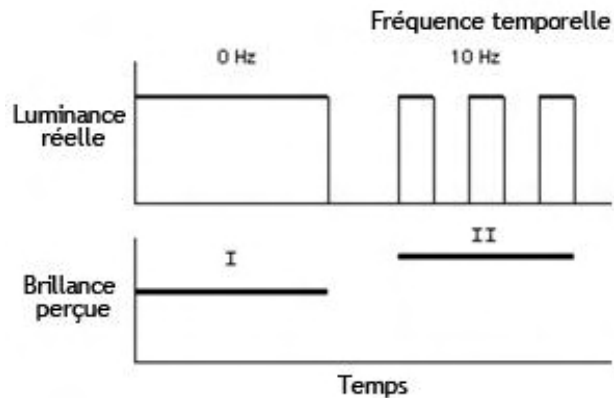


Figure 73 Illustration du phénomène Brücke-Bartley

Loi de Talbot-Plateau

La loi de Talbot-Plateau décrit la luminance d'une source de lumière vibrante qui possède une fréquence supérieure à la FFC. Cette loi stipule qu'au-dessus de la FFC, la luminance perçue issue de la source de lumière vibrante est égale à la luminance moyenne perçue équivalente au signal continu. Donc pour une même quantité d'énergie, au-delà de la FFC, nous aurons la même luminance (41)

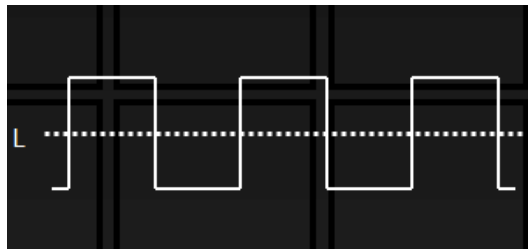


Figure 74 Illustration de la loi de Talbot Plateau : La luminance ressentie pour un papillotement de la lumière de fréquence supérieure à la FFC est la luminance moyenne (59)

Effet Broca et Sulzer : brillance d'une lumière vibrante.

Les figures ci-dessous illustrent le fait que la brillance perçue d'une lumière pulsée à intensité constante, comparée à une lumière continue de même intensité, se modifie en fonction de la durée du flash. Il y a donc une différence entre la luminance émise et la sensation de brillance qu'elle induit. Nous parlons du phénomène « d'ondulation de pré-équilibre », aussi dit effet Broca et Sulzer.

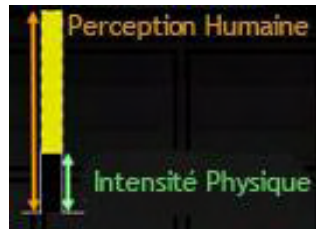


Figure 75 Brillance ressentie d'un flash comparé à sa luminance mesurée (59)

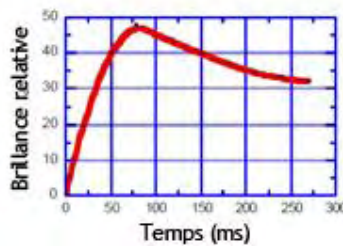


Figure 76 Variation de la brillance ressentie en fonction de la durée d'un flash d'intensité constante.

Plusieurs tests ont été réalisés avec différentes intensités lumineuses de flashes et de durées, ceci permettant d'obtenir les courbes ci-dessous :

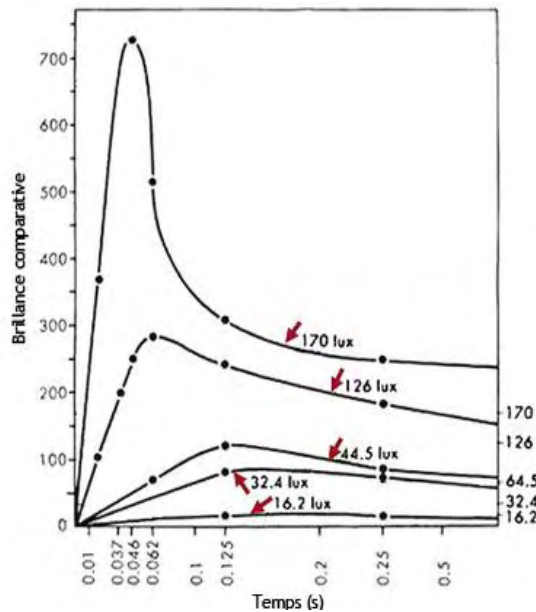


Figure 77 Brillance apparente (ou ressentie) de flashes avec des luminances variables et fonction de la durée du flash. Effet Broca et Sulzer (60)

Nous constatons que la brillance subjective du flash est plus forte avec des durées de flash de 37 à 100 millisecondes et que, dans cette plage de durées, plus le niveau d'éclairement augmente (et donc plus la luminance du flash augmente), plus le pic de brillance est prononcé. Ce pic transitoire apparent de brillance est probablement dû à un mécanisme biologique et/ou neuronal sous-jacent.

Nous observons également un tassement de brillance en plateau, ou ondulation de pré-équilibre, qui montre un retour progressif vers les luminances réelles lorsque les durées de flash sont plus longues. (41)

Le papillotement de la lumière peut être défini comme la perception visuelle de flashes réguliers provenant d'une source. Quand la lumière est faite de flashes à basse fréquence et 100% de modulation, l'œil perçoit distinctement l'alternance de lumière on/off et a une sensation de brillance. A une fréquence plus élevée le papillotement de la lumière disparaît et donne l'impression que la lumière émise est stable. Le patient a atteint sa FFC. L'effet de brillance semble s'amenuiser avec l'augmentation en fréquence du signal.

e. Papillotement de la lumière et effet stroboscopique

Si nous couplons le contraste temporel à un mouvement ou des variations périodiques de contraste spatial, un effet stroboscopique peut s'établir. Et ces effets stroboscopiques peuvent alors conduire à des maux de tête voire des crises d'épilepsie (dites photosensibles) selon les individus.

Voici un graphe présentant le pourcentage de détection de l'effet stroboscopique par un panel d'observateurs :

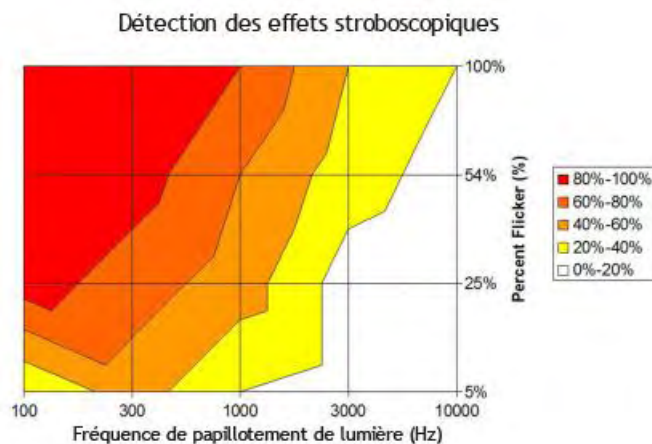


Figure 78 Détection de l'effet stroboscopique en fonction de la fréquence et du pourcentage de modulation (66)

Il a également été déterminé la préférence et acceptabilité de l'effet stroboscopique par les observateurs, suivant une échelle d'acceptabilité :

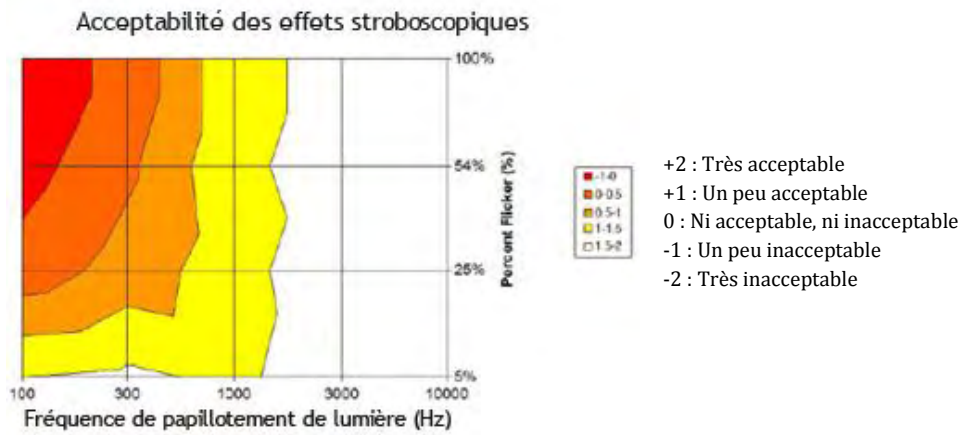


Figure 79 Acceptabilité de l'effet stroboscopique. (61)

5. Détail de quelques expériences actuelles

a. Papillotement de la lumière et brillance - LEDs colorées – stimulus direct et indirect. Comparaison mode continu et pulsé. Université d'Ehime (Japon) (59)

Dans cette expérience, trois LEDs chromatiques sont utilisées : bleue (464 nm), verte (520 nm), rouge (633 nm), et choisies de telle sorte qu'elles aient des caractéristiques de puissance similaires. Elles peuvent servir à créer une lumière directe, ou indirecte pour éclairer des objets comme le montre la Figure 80:

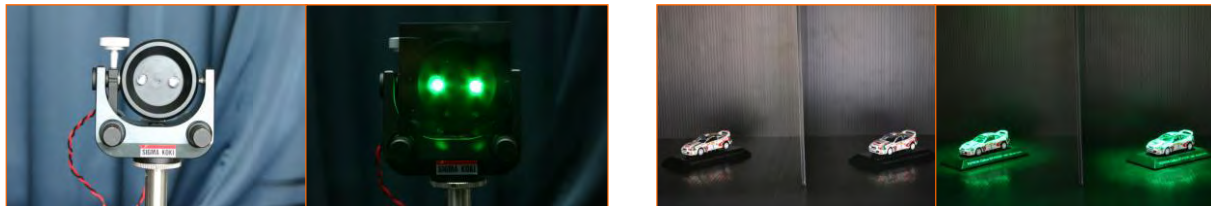


Figure 80 Les deux expériences : vision directe et indirecte de la lumière colorée- mode continu comparé au mode pulsé. (59)

Lors des expériences en vision directe des sources, les observateurs sont installés à une distance de 1 m. Des filtres neutres ont été placés devant les sources pour éviter tout risque d'éblouissement. Dans le cas de la perception indirecte de lumière éclairant un objet, les observateurs sont placés à une distance de 30 cm. L'expérience a été menée avec vingt observateurs.

Pour chaque LED, et dans les deux expériences les observateurs doivent évaluer si la LED alimentée en impulsions est plus brillante, ou non, ou équivalente à la lumière continue.

De manière globale, et après analyse détaillée, ils ont montré que :

- nous pouvons améliorer la perception visuelle de l'homme par papillotement de la lumière au-delà de la FFC. A 60 Hz et 5% de rapport cyclique, la perception visuelle a été améliorée et multipliée par 2.
- En vision directe et indirecte, l'effet d'amélioration de la perception est valide. Jusqu'à +120% d'amélioration est observée.
- Ils ont aussi constaté que pour la LED rouge en condition de vue indirecte, tous les sujets ont ressenti la lumière comme étant sombre, ce qui peut provoquer une baisse de la perception.

b. Papillotement de la lumière et brillance pour perception d'objets. Mode continu comparé au mode pulsé - Université de Technologie de Bialystok (Pologne) (62)

Cette expérience est constituée d'une double boîte séparée en deux parties contenant les sources, et de la zone d'observation d'objets.



Figure 81 Boîte expérimentale

Durant l'expérience, l'éclairage des deux compartiments est à 250lx moyen. A gauche la LED pulsée est à 60 Hz et 10 % de rapport cyclique, à droite, la lumière est continue. Dans chaque compartiment, les mêmes ensembles d'objets ont été installés. 10 observateurs, à vision normale, ont réalisé l'expérience. Leur vue a été étalonnée pendant une minute et adaptée à l'éclairage du réglage initial.

Ensuite, l'éclairage du côté pulsé a été augmenté ou diminué par variation du rapport cyclique et les observateurs avaient pour objectif d'ajuster le niveau d'éclairage de la lumière pulsée afin que les deux côtés de la cabine leur paraissent de même luminosité.

A la fin de chaque mise au point, les luminances et éclairagements ont été mesurés. L'expérience a été répétée quatre fois, avec des scénarii différents de démarrage.

Globalement, après que les observateurs aient ajusté à même perception de brillance le côté pulsé et le côté continu, il s'est avéré que les luminances de chaque côté étaient quasiment les mêmes, et ceci malgré des scénarii aléatoires de début d'expérience.

Ceci montre donc qu'aucun effet d'économie d'énergie n'est possible par LED pulsées à 60 Hz.

L'expérience a également été réalisée en modifiant la fréquence du papillotement de la lumière, et certains observateurs ont rapporté que le papillotement de la lumière était ennuyeux à 60 Hz. Il était à peine perceptible à 70 Hz, et sans observation de la vibration à 80 Hz.

Remarque : ces résultats vont en contradiction avec l'expérience précédente.

c. Papillotement de la lumière et tâche visuelle sur poste de travail – Institut Polytechnique de Rensselaer (USA)

Cette expérience consiste en l'étude de la perception d'un poste de travail avec ordinateur éclairé par une lumière vibrante. (63) Ci-dessous une illustration du montage expérimental :

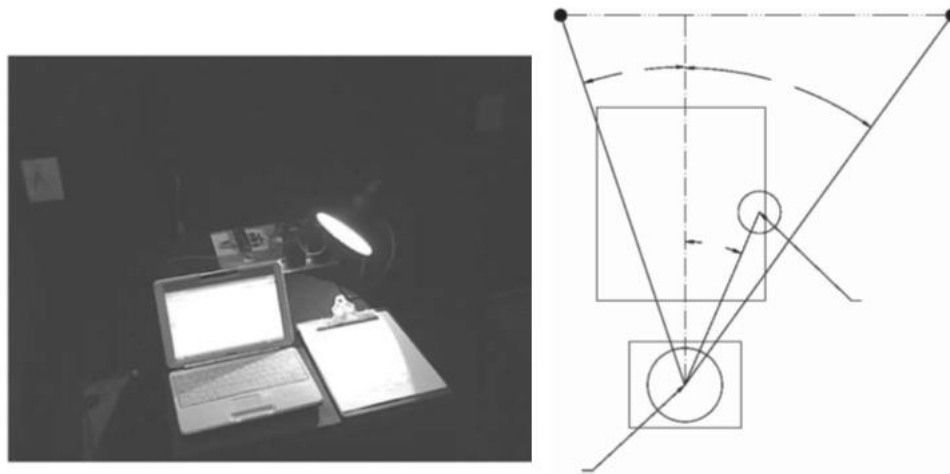


Figure 82 A gauche : photographie de l'expérience au laboratoire à la place d'un observateur – A droite : positionnement des éléments par rapport au champ de vision de l'observateur situé en bas à gauche

Cette expérience traite de la perception d'un environnement de travail avec ordinateur éclairé par une lampe dont la source est vibrante, dans une salle noire. L'objectif est de déterminer des limites d'inconfort. A également été ajouté en plus du papillotement de la lumière un effet stroboscopique créé par le mouvement d'une main.

Les auteurs ont travaillé sur la variation de multiples paramètres à même niveau d'éclairage : la fréquence, le pourcentage de modulation, le rapport cyclique, la longueur d'onde et la température de couleur.

Les résultats sont binaires et analysés via le test Q de Cochran qui permet de comparer deux échantillons appariés dont les valeurs sont binaires.

Le tableau Figure 83 présente les différentes expériences menées :

| Expérience | Fréquence de papillotement (Hz) | Taux de modulation (%) | Flicker index (%) | Rapport cyclique (%) | Longueur d'onde | Température de couleur (K) |
|------------|---------------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 | 50 | 100 | 0.50 | 50 | Rectangulaire | 4000 |
| 2 | 60 | 100 | 0.50 | 50 | Rectangulaire | 4000 |
| 3 | 100 | 100 | 0.50 | 50 | Rectangulaire | 4000 |
| 4 | 120 | 100 | 0.50 | 50 | Rectangulaire | 4000 |
| 5 | 300 | 100 | 0.50 | 50 | Rectangulaire | 4000 |
| 6 | 120 | 100 | 0.90 | 10 | Rectangulaire | 4000 |
| 7 | 120 | 33 | 0.17 | 100 | Rectangulaire | 4000 |
| 8 | 120 | 100 | 0.41 | 60 | Sinusoidale hachée | 6000 |
| 9 | 120 | 100 | 0.90 | 10 | Rectangulaire | 2700 |

Figure 83 Tableau présentant les neuf conditions expérimentales de l'étude. (63)

Voici les principales conclusions obtenues (63) :

- Effet de la fréquence du papillotement de la lumière (comparaison des conditions expérimentales 1 à 5) :
 - Il a été montré qu'à des fréquences de 100Hz et plus, la perception du papillotement de la lumière lors d'un travail sur ordinateur portable, tout en regardant directement le luminaire ou en regardant ailleurs en créant un angle avec le luminaire, est négligeable.
 - La perception directe de scintillement à des fréquences de 60 Hz est faible et classée comme inacceptable : inconfortable.
 - En revanche, la perception indirecte du scintillement à travers un effet stroboscopique est plus faible pour les fréquences plus élevées mais n'a pas été complètement inhibée, même à 300Hz. Néanmoins, les sujets ont évalué leur perception de ces effets comme tout à fait acceptables tant que la fréquence est d'au moins 100Hz.
- Effet de quantités différentes de modulation (comparaison des conditions 4 et 7) :
 - L'expérience a montré que la réduction de la modulation du scintillement (de 100% à 33%) a permis de réduire la perception de l'effet stroboscopique.
- Effet du rapport cyclique (comparaison des conditions 4 et 6) :
 - Pour de faibles rapports cycliques, la perception en vision directe de l'effet stroboscopique est plus grande que pour de forts rapports cycliques, ce qui est inconfortable pour l'ensemble des observateurs. Lorsque l'axe de perception n'est pas direct, les résultats sont les mêmes, mais les réponses ne sont pas unanimes.

III- PATHOLOGIES VISUELLES DUES A LA PERCEPTION DIRECTE DE LUMIERE

Les éléments présentés dans cette section sont issus d'un rapport de l'ANSES (18). Voici ci-après quelques exemples présentant l'impact de la lumière, naturelle ou artificielle sur la rétine.

1. Lumière bleue et EPR (Epithélium Pigmentaire Rétinien)

De nombreuses études ont montré que les plus courtes longueurs d'onde dans le spectre visible sont les plus dangereuses pour la rétine. Elles sont à l'origine de mécanismes de toxicité et de dommages du potentiel photochimique sur la rétine.

« L'interaction de la lumière bleue avec des molécules constituant la rétine est susceptible d'entraîner des dommages aux cellules de l'épithélium pigmentaire rétinien (EPR) aux photorécepteurs et aux cellules ganglionnaires. » Aussi l'exposition avec des sources telles que les LEDs au phosphore inquiète, puisque leur spectre présente un pic dans le bleu. (18)

2. Exposition aiguë au soleil: rétinite solaire

L'exposition directe du regard vers le soleil est à l'origine de lésions dans les cellules de l'EPR. Après quelques minutes d'exposition, des déficiences visuelles apparaissent. Cela induit des degrés de gênes visuelles variés et scotome (tache aveugle dans le champ visuel central). Il est maintenant bien reconnu qu'une exposition à la lumière bleue induit des lésions rétiniennes provoquant des dommages chimiques similaires à ceux observés après observation de la lumière du soleil. (18)

Nous comprenons ainsi mieux pourquoi il est déconseillé de regarder le soleil de façon directe. Toutefois, dans certaines situations spécifiques, une exposition accrue à la lumière peut se produire : par exemple, à midi, lorsque la neige est éclairée par le soleil (lumière indirecte), la luminance peut atteindre 100 000 cd/m². (18)

3. Exposition chronique : lien avec la DMLA (Dégénérescence Maculaire liée à l'Age)

Aucune étude épidémiologique n'a encore pu mettre en évidence une relation directe entre une exposition prolongée à la lumière et la DMLA. Cependant, certaines études sur cinq ans du « Beaver Dam Eye Study » ont montré des résultats tendant vers la validation de cette hypothèse. Des études sont encore en cours. (18)

4. Lumière artificielle des instruments ophtalmologiques

La durée d'éclairement de la rétine au travers d'une pupille dilatée augmente le risque de dommages rétiens. Ceci pose notamment des problèmes dans les salles d'opérations où les patients sont soumis aux lumières artificielles des microscopes opératoires qui produisent des lésions paramaculaires proches de celles induites par l'exposition à la lumière bleue. Actuellement, une filtration à la lumière bleue minimise les risques. « Plusieurs rapports ont également identifié la sortie de lumière bleue comme le principal risque pour la rétine par rapport à des longueurs d'onde dans les gammes du rouge et des UV (Cowan, 1992). » (18) « La limitation de la durée de la chirurgie, l'application d'un masque pupillaire pendant des interventions chirurgicales prolongées et la limitation de luminance, ont réduit de tels accidents. » (18)

5. Exposition du soudeur

Les soudeurs sont exposés à l'arc du soudage qui expose leur vision aux rayons UV ainsi qu'à la lumière bleue. Ceci constitue un risque professionnel et des protections adaptées sont nécessaires.

Cette exposition à l'arc induit des kérato-conjonctivites (dommages douloureux mais non permanents), ainsi que des dommages rétiens photosensibles. Le temps d'exposition direct est d'ailleurs limité à quelques secondes pour éviter les dommages.

6. Exposition à des lumières artificielles courantes

Voici ci-dessous deux tableaux présentant les luminances maximales pouvant être induites si nous regardons directement des sources lumineuses du quotidien.

| Sources de lumières artificielle | Luminance (cd/m ²) |
|---|--------------------------------|
| Ampoules à filament de tungstène | 10 000 000 |
| Ampoules de théâtre à filament de tungstène | 20 000 000 |
| Arc électrique de carbone | 160 000 000 |
| Arc au xénon | 400 000 000 |
| Lampe au mercure haute pression | 500 000 000 |
| Soleils à travers l'atmosphère | 1 600 000 000 |
| Flashes, pendant quelques micro secondes | 10 000 000 000 |

Figure 84 Valeur de luminances de quelques sources courantes de lumière artificielle (18)

| Sources de lumière étendue | Luminance (cd/m ²) |
|----------------------------|--------------------------------|
| Mur blanc (à midi en Mars) | 10 000 |
| Tube fluorescent | 10 000 |
| Ciel bleu | 5000 |
| Ecran de télévision | 300 |
| Ecran d'ordinateur | 150 |

Figure 85 Valeurs de luminances de quelques sources courantes (18)

7. Evaluation des risques de la lumière bleue

L'évaluation des risques à la lumière bleue a été réalisée dans le respect des exigences de la norme EN 62471 qui concerne la sécurité photobiologique et thermique des lampes et des appareils utilisant des sources pouvant affecter les yeux et la peau.

Le tableau ci-dessous donne une indication sur les limites de temps d'exposition à la lumière bleue à ne pas dépasser en fonction du groupe de risque que présente une source de lumière (groupe de risque défini par la luminance et le rayonnement) :

| Temps d'exposition maximal admissible (t) | Groupes de risque |
|---|------------------------------------|
| $t \geq 10\,000\text{ s}$ | Groupe de risque 0 |
| $100\text{ s} \leq t < 10\,000\text{ s}$ | Groupe de risque 1 (faible risque) |
| $0.25\text{ s} \leq t < 100\text{ s}$ | Groupe de risque 2 (risque modéré) |
| $t < 0.25\text{ s}$ | Groupe de risque 3 (fort risque) |

Figure 86 Le groupe de risque et les valeurs limites de risque d'exposition à la lumière bleue de la norme EN 62471, qui définit un schéma de classification pour lampes et les systèmes de lampes, fondé sur la quantité de risques présents dans la lumière. (18)

Remarque :

- L'optique d'une source peut modifier la répartition du flux, et modifier l'appartenance à un groupe de risque à la lumière bleue. En effet, des expériences ont montré qu'il n'est pas possible de transférer le groupe de risque d'une LED individuelle à un ensemble de LED (module, lampe ou luminaire).
- Il est également important de spécifier à quelle distance les mesures ont été effectuées car, dans le cas des LEDs par exemple, selon la distance, la classe de risque peut changer. Il y a donc une importance à la création d'un guide réglementaire qui aiderait à la conception et minimalisation des risques.

8. Impacts du papillotement de la lumière

Comme nous l'avons dit précédemment, le papillotement de la lumière peut être perçu consciemment ou inconsciemment, et cela va induire divers effets biologiques :

- S'il est perçu de façon directe, les effets biologiques seront immédiats. Par exemple :
 - Malaises ;
 - Maux de tête et migraines (64) (65) ;
 - Crises d'épilepsie et convulsions (66) ;
 - Symptômes neurologiques.

- Si le papillotement de la lumière est invisible et donc perçu inconsciemment, des effets biologiques, moins évidents, apparaîtront après une exposition prolongée (environ 20 minutes) (44). Par exemple :
 - Maux de tête et migraines
 - Fatigue oculaire, asthénopie, baisse de performance visuelle (67) (65)
 - Crises d'épilepsie et convulsions

Il a été constaté que :

- Le scintillement invisible est plus susceptible de causer des problèmes lorsque la tâche visuelle exige un positionnement précis des yeux, comme lors de la lecture.
- Le papillotement de la lumière incombe à la lumière naturelle et à tout système de lumière artificielle, y compris les LED. Toutefois, une source ponctuelle isolée est moins susceptible de provoquer des crises et des maux de tête qu'une source diffuse qui couvre l'ensemble du champ visuel d'une personne. Par contre des problèmes d'éblouissement dus au papillotement sont plus susceptibles d'intervenir lorsque la source est petite et lumineuse.

Maux de tête et fatigue oculaire

Des maux de tête ou des fatigues oculaires peuvent survenir, et font parti des risques moins évidents dus au papillotement de la lumière. Ces risques sont subtils et insidieux et ne doivent pas être pris à la légère. En effet, les migraines peuvent s'avérer invalidantes, pouvant même entraîner un risque accru d'accident vasculaire cérébral. (44)

Saccades oculaires

La lumière vacillante peut également affecter les saccades oculaires, qui sont des mouvements conjugués et volontaires entraînant des changements de fixation observés pendant la recherche visuelle. Cela amène l'image rétinienne à être vue sur la fovéa. (67)

Symptômes asthénopiques

Dans une étude de Wilkins (64) comparant les différences entre faibles et hautes fréquences du papillotement de la lumière, il a été montré que les yeux ont tendance à dépasser la cible, provoquant des symptômes asthénopiques. Par définition, l'asthénopie correspond à une faiblesse des yeux avec douleurs oculaires, des céphalées et baisse de l'acuité. La mesure de la phorie (cf. glossaire p210) permet d'anticiper, par exemple, des plaintes d'asthénopie.

« Une attention toute particulière sera portée aux professions exigeant une vue attentive et soutenue de près (informaticien, secrétaire, étudiant...). En effet, ces dernières sont exposées aux troubles de la phorie. » (68)

Epilepsie photosensible

Les crises d'épilepsie sont l'inconvénient majeur du papillotement de lumière. Elles s'avèrent

majoritairement déclenchées dans des fréquences comprises entre 5 et 20 Hz pour des personnes photosensibles épileptiques (69).

Plus d'informations sur le phénomène des crises d'épilepsie et sur les caractéristiques physiques des stimuli lumineux déclenchant les crises en **Annexe 9**.

Bilan : sources de lumière et leurs effets biologiques

Globalement, il est intéressant de retenir que :

- Les sources fluorescentes alimentées par ballast magnétique vibrent à deux fois la fréquence du secteur et vont induire des maux de tête ;
- Les sources ponctuelles de lumière sont moins susceptibles de provoquer des crises et des maux de tête qu'une source de lumière diffuse qui couvre un large champ de vision ;
- Le papillotement de la lumière invisible est plus à même de causer des problèmes lorsque la tâche visuelle exige un positionnement précis des yeux, comme lors de la lecture (44).

Le tableau en **Annexe 10** répertorie les sources présentant du papillotement de la lumière, leur gamme de fréquences et effets biologiques associés. La dernière colonne présente les références d'études.

a. Impacts du papillotement de la lumière sur le confort et la performance visuelle

Performance et confort sous lampes fluorescentes (2 types de ballasts) :

Veitch et McColl ont comparé la performance visuelle et le confort visuel sous éclairage fluorescent fonctionnant :

- sur des ballasts magnétiques (120 Hz, 43-98% de papillotement de la lumière, de 0,14 à 0,33 de flicker index)
- sur ballasts électroniques (20-60 KHz, % papillotement de la lumière et flicker index inconnus)

Ils ont observé de petites différences de performance, mais pas vraiment de différences sur le confort. (53 pp. 243-256)

Localisation d'objets sous papillotement de la lumière et inconfort

Noritake a constaté que la localisation des objets sous une source vibrante (200 Hz, 100% de papillotement de la lumière, 0,8 flicker index) était moins précise, ceci pouvant contribuer à des erreurs de jugement et à de l'inconfort visuel. (70)

CHAPITRE 4

PAPILLOTEMENT DE LA LUMIÈRE : Etudes
phénoménologiques, notion de brillance,
étude d'une application concrète

INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre nous allons nous intéresser plus particulièrement aux vibrations temporelles successives de lumière, ou papillotement de la lumière.

Le papillotement de la lumière, présent pour toute installation d'éclairage, peut occasionner de simples maux de tête à des crises d'épilepsie, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. En revanche son utilisation intelligente pourrait permettre des économies d'énergie et engendrer une autre manière de s'éclairer.

Aussi, ce chapitre sera dédié aux études phénoménologiques menées dans notre laboratoire, le laboratoire LAPLACE. La conception expérimentale sera détaillée, et présentera nos objectifs, le dispositif expérimental mis en place d'un point de vue mécanique et électronique, ainsi que le protocole expérimental en considérant l'aspect humain et le choix de population.

De nombreux facteurs peuvent affecter de façon directe ou indirecte notre perception visuelle du papillotement de la lumière, tel le rapport cyclique, la forme de la longueur d'onde, la couleur (71 pp. 251–320). C'est sur cela que nous nous sommes appuyés pour mettre en place nos expériences, mais, contrairement à ce qui a été réalisé jusqu'alors, nous avons choisi le cas d'un stimulus de lumière indirect et surfacique (72).

Ainsi, plusieurs expériences ont été réalisées. Le papillotement de la lumière, crée artificiellement par diodes électroluminescentes (LED), dépend de la fréquence et du rapport cyclique. L'éclairage est indirect, et nous avons considéré plusieurs environnements : blanc, sombre et colorés, en vision fovéale et périphérique. Une première approche comparative des résultats avec des individus ayant une amétropie a également été menée.

Les résultats obtenus par expérimentations sont donc caractéristiques des ressentis des observateurs. Afin de les analyser, nous avons utilisé une nouvelle méthode statistique dite méthode d'optimisation, qui va permettre de mettre en exergue certains couples [fréquence, rapport cyclique], qui d'un point de vue psychophysologique paraissent être des paramètres plus confortables ou inconfortables pour les observateurs.

Nous nous interrogerons également sur la définition de la brillance ressentie en comparaison de la brillance mesurée ou luminance. L'effet Broca Sulzer se vérifie-t-il dans le cas d'une lumière indirecte? Des économies d'énergie sont-elles envisageables? Quels paramètres peuvent avoir un impact sur les variations de ressenti, et comment pouvons-nous le formaliser?

Suite à cela, une approche pratique sur une application concrète du papillotement de la lumière est proposée pour l'éclairage des musées. Cette étude s'intéresse à la dégradation colorimétrique causée par des LEDs, alimentées en courant continu, comparée à celle causée par des LED alimentées en courant impulsionnel, avec éclairage moyen constant.

I. CONCEPTION EXPERIMENTALE

1. Le dispositif expérimental : paramètres techniques

a. Le dispositif expérimentale

La phase de montage expérimental s'est faite en collaboration avec le service mécanique et le service instrumentation du laboratoire LAPLACE. Via discussions autour du projet et de ses besoins, un cahier des charges a été établi, et une structure expérimentale a été réalisée et optimisée.

Il s'agit d'un caisson en bois, dont l'extérieur est peint en noir, et à l'intérieur duquel nous pouvons changer la couleur des parois. Ce caisson est divisé en deux compartiments distincts, ceci afin de pouvoir soit effectuer des comparaisons de lumière soit de faire passer deux observateurs simultanément et indépendamment de chaque côté. Ses dimensions sont reportées sur les graphiques.

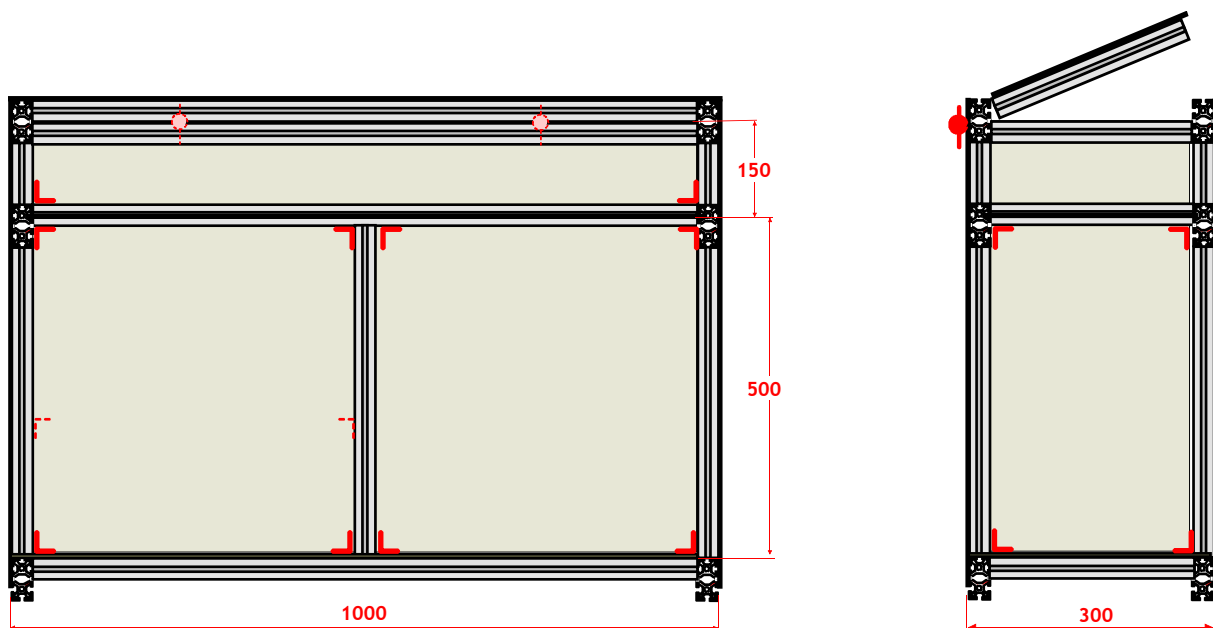


Figure 87 Dispositif expérimental en élévation, vue de face et vue de profil

Ce dispositif expérimental est placé dans une salle noire, afin d'isoler l'impact de la lumière pulsée émise par les LEDs et d'éviter toute lumière parasite.

Des LEDs sont placées sur le dessus de la boîte qui peut s'ouvrir. Elles ne sont donc jamais visibles de manière directe. Un diffuseur en verre dépoli est installé de sorte que la lumière soit diffusée dans toute la zone d'étude.

Pour créer le papillotement de lumière, deux paramètres sont utilisés : la fréquence et le rapport cyclique. Les LEDs utilisées ont les spécifications suivantes : Modèle Bridgelux BXRA-30G0540-A-00- 18V – 540 lumens – blanc chaud de 3000 K. Pour chaque scénario la LED génère un éclairage moyen de 167 lux sur la surface du fond observée. L'éclairage perçu est donc indirect.

b. Le système électronique et logiciel

La collaboration avec le service électronique du laboratoire LAPLACE nous a permis de réaliser des boîtiers électroniques capables de commander l'alimentation des LEDs. Un programme de commande piloté par ordinateur a été mis en place. Voici plus en détail les caractéristiques.

Le système électronique utilisé pour cette expérience a trois fonctions majeures :

- En premier lieu, il doit fournir l'énergie aux LEDs en mode générateur de courant, continu ou pulsé ;
- Ensuite, il doit mesurer le courant qui alimente la charge lumineuse, ainsi que la tension aux bornes de celle-ci. Cela permet ainsi de connaître la puissance consommée par la LED ;
- Enfin, la troisième fonction est d'asservir, à partir d'une référence choisie par l'utilisateur, ce paramètre de puissance, en utilisant le courant ou la tension comme variable d'ajustement. Le générateur est capable de fonctionner en mode continu et en mode impulsionnel contrôlé par un régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé).

Dans le mode impulsionnel, la fréquence, le rapport cyclique et la valeur crête du courant généré, sont réglables par l'utilisateur. Cette configuration peut être utilisée en mode local, par l'intermédiaire d'un clavier devant le dispositif, ou en mode « à distance » à partir d'un PC sous Windows, via une communication USB.

Le dispositif est composé de deux sections différentes comme nous pouvons le voir sur le schéma ci-après (Figure 88):

- La partie n° 1, pour fournir de l'énergie à la LED, mesure son intensité et sa tension via un amplificateur opérationnel précis et rapide (AD712) ;
- la partie n° 2, pour acquérir les mesures, réguler la puissance et contrôler de la mise en valeur de point ;
- La dernière partie est construite autour d'un circuit Cypress (modèle Y8C5568AXI-060).

Ainsi, ce système électronique est capable de contrôler des sources de lumière avec un courant moyen de 0,35A maximum, sous une tension 18V (pour notre LED modèle BXRA-30G0540-A-00), et la plage de fréquence autorisée est de 5 Hz à 1 MHz, avec un rapport cyclique allant de 0% à 100%.

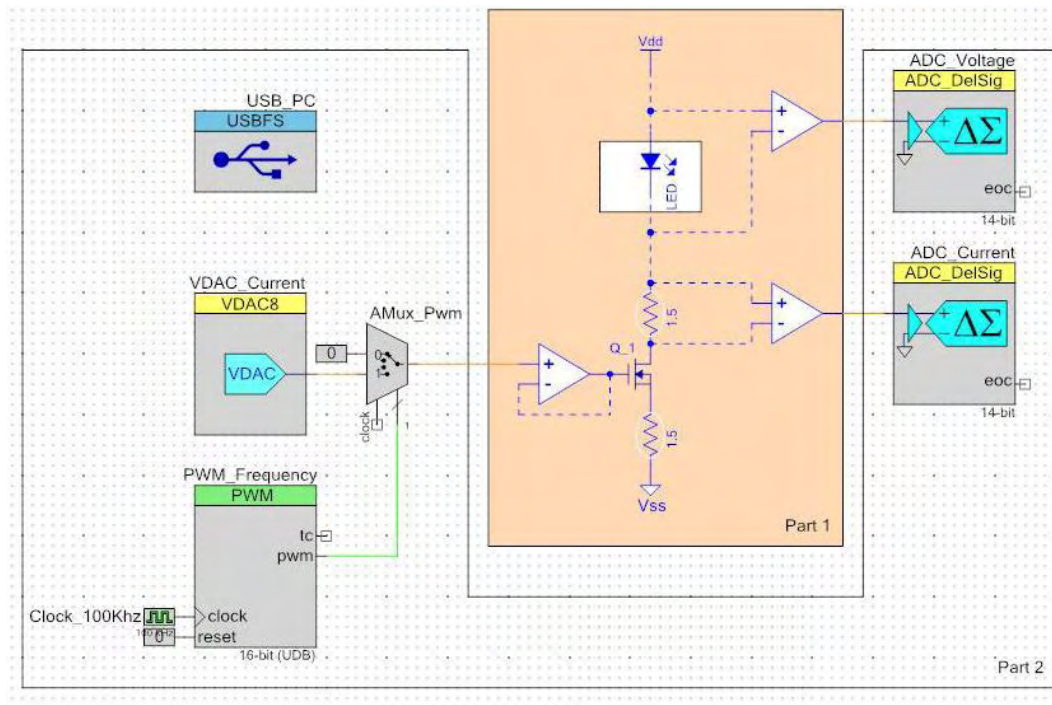


Figure 88 Le système d'alimentation électronique

2. Nos objectifs et choix expérimentaux

Les campagnes d'expériences présentées dans ce manuscrit ont pour objectif d'approfondir les recherches sur le comportement psychophysique de la perception visuelle de l'être humain soumis à des variations temporelles de flux lumineux. Dans cette étude, le papillotement de lumière est créé suivant deux paramètres : la fréquence et le rapport cyclique ; et nous ne considérons que la perception indirecte de la lumière émise.

Nous avons choisi une forme d'onde carrée PWM (Pulse Width Modulation ou Modulation par Largeur d'Impulsion), et une régulation en puissance moyenne, ce qui revient à réguler en éclairage moyen, ou même en luminance moyenne. Les contrastes de luminances temporels sont toujours maximaux, en tout ou rien (allumé-éteint) d'où un taux de modulation toujours égal à 100%.

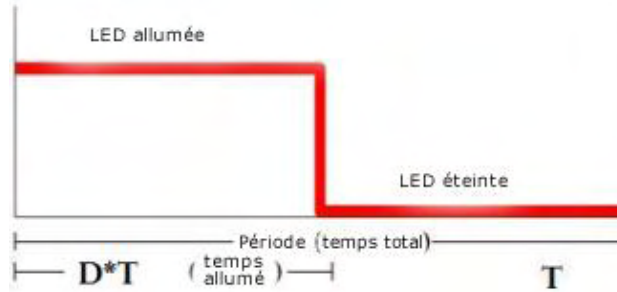


Figure 89 Modulation par Largeur d'Impulsion (PWM) sur une période $T - D$: rapport cyclique

Selon le rapport cyclique, les pics de luminance induits sont variables, d'où des contrastes de luminances plus ou moins forts selon les scénarii. En effet, le fait de travailler en régulation de puissance moyenne implique que les plus petits rapports cycliques génèrent les pics de luminance les plus élevés, et que la luminance moyenne perçue sera toujours de la même valeur quelque soit le rapport cyclique.

Nous avons vu précédemment que le rapport cyclique a un impact sur les valeurs du « flicker index », ce qui donne pour nos cas extrêmes :

| Rapport cyclique γ | Flicker Index F_i |
|---------------------------|---------------------|
| 20% | 0,8 |
| 90 % | 0,1 |

Figure 90 Rapports cycliques extrêmes et flicker index associés

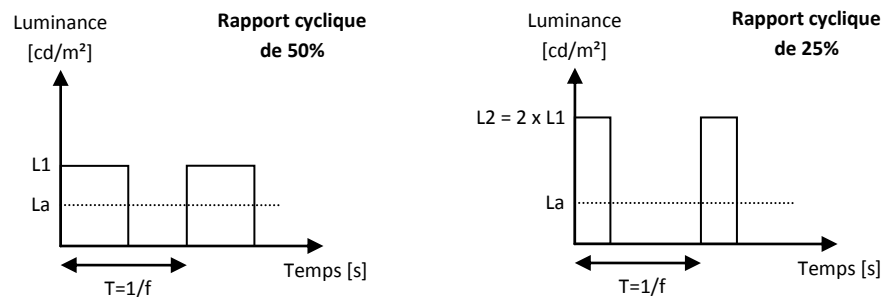


Figure 91 Signal lumineux émis

Nos expériences étant réalisées en mode pulsé et en régulation de puissance moyenne, nous devons considérer les valeurs limites afin de pouvoir créer le papillotement de la lumière. (Car c'est au plus petit rapport cyclique que la puissance crête sera la plus élevée.) Nous avons donc calculé qu'il nous fallait une alimentation d'une puissance moyenne de 1,9 W pour couvrir l'ensemble des rapports cycliques (de 20% à 90%).

Le protocole expérimental : paramètres humains

Nous avons choisi une approche par expérimentation sur l'être humain. « Elle fournit un grand nombre de données, mais les résultats sont parfois difficiles à traiter, notamment de part les différences inter et intra individuelles. Il est ainsi important de travailler sur un nombre suffisant d'individus pour pouvoir traiter statistiquement les données et obtenir des résultats significatifs. Ceci nous permettant d'aboutir à des connaissances sur le comportement moyen de l'homme » (8 pp. 16-60)

Nos campagnes d'expériences sont réalisées en laboratoire, et nous fixons de nombreux paramètres (présentés en début de chaque expérience). Notons que dans la réalité, les résultats peuvent être quelque peu différents, des implications affectives des individus avec leur environnement pouvant survenir.

a. Population ciblée, appel à participation et questionnaire.

En amont des tests expérimentaux, des critères de choix sur la population de participants a dû être définie.

Initialement de nombreux paramètres intéressants et pouvant peut être influencer notre perception visuelle ont été mis en évidence, tels que le genre, l'âge, la nationalité, le métier, la couleur des yeux, les problèmes visuels, etc.

Ainsi, de par ces multiples critères un grand nombre de cas expérimentaux se sont révélés intéressants à distinguer. Cependant, suite à de nombreux appels à participation, il s'est avéré très difficile de réunir un panel suffisant pour chaque cas. Ainsi, il nous a donc fallu restreindre les critères de choix d'observateurs et cibler les expériences à réaliser.

Les caractéristiques majeures qui ont finalement été retenues sont :

- Des observateurs peu ou non sensibilisés à la problématique de lumière vibrante.
- Une tranche d'âge de 20 à 39 ans, en sachant que statistiquement, l'âge où la vision est la meilleure est de 20 ans.
- Les caractéristiques visuelles : les premières études se sont focalisées sur la vision emmétrope ou avec correction optique dans le cas de problèmes de conformation.

Remarque : l'appel à participation permettait bien sûr à tout observateur, présentant des caractéristiques visuelles ou d'âges différents des critères initiaux, de participer. Leurs réponses aux expériences ont été conservées séparément, pour des analyses futures.

Les informations propres à chaque observateur ont été renseignées par leurs soins dans un questionnaire en amont des tests expérimentaux (Cf. **Annexe 11**) Ceci qui nous a permis notamment d'amorcer des recherches sur quelques amétropies, la myopie en particulier.

Par contre, si les participants étaient sujets à de la photosensibilité ou crise d'épilepsie, par mesure de sécurité, ils n'ont pas été retenus pour participer à l'expérience.

Au final, le panel d'observateurs pour les expériences principales s'élève à environ 25 individus par expérience, ce qui permet d'en tirer des résultats cohérents et représentatifs. Pour les expériences complémentaires présentées dans ce manuscrit, bien souvent le panel d'observateurs est moins élevé, ce qui est systématiquement indiqué.

b. Les conditions expérimentales

Les campagnes d'expériences traitent de l'adaptation à la lumière vibrante. Les participants, dont la vue est étalonnée à la lumière photopique, entrent dans la salle noire dans laquelle la boîte expérimentale est déjà allumée. Concernant l'adaptation à l'obscurité, les observateurs passent d'un environnement proche de 500 lux (salle d'attente) à une surface d'observation de 165 lux. Nous restons donc dans des conditions photopiques, et avec le temps des consignes, l'œil est adapté au premier scénario déjà allumé.

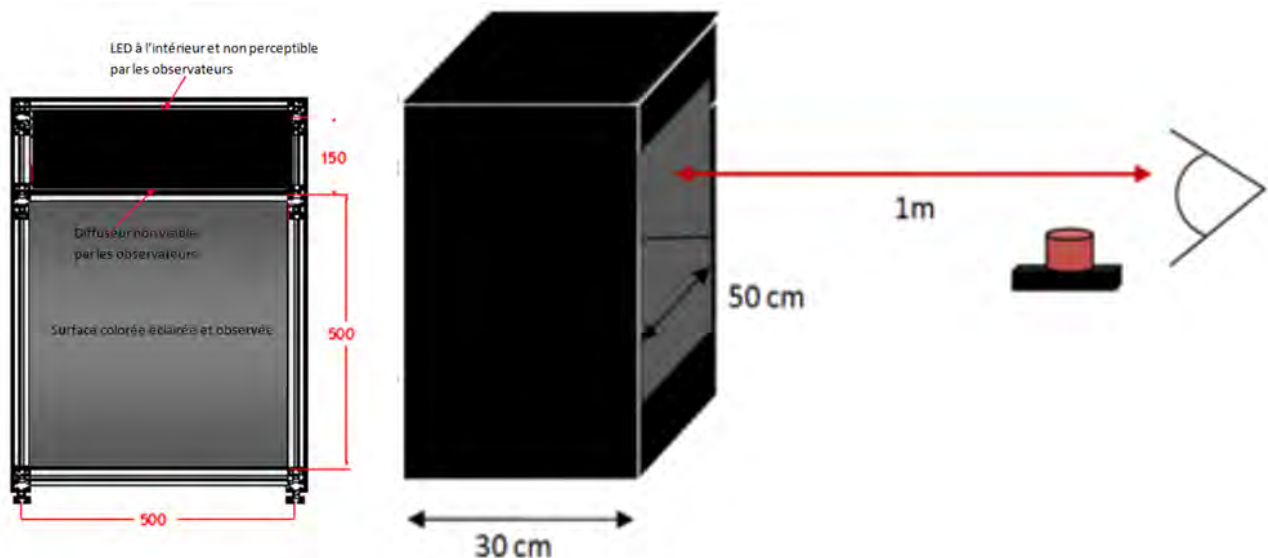


Figure 92 Dispositif expérimental et positionnement de l'observateur – cas du fond sombre.

Les observateurs s'installent à une distance d'un mètre du bord de la boîte lumineuse, le fond de la boîte étant alors à 1,30m, ainsi, le champ visuel avoisine les 21° (la zone se situe dans le champ d'ouverture utilisé pour le travail, nommé *ergorama*).

Cette distance d'un mètre correspond à une distance correcte de focalisation nette pour un œil sain, le *punctum proximum* étant de 0,25m et *punctum remotum* à l'infini. (Définition cf. [Annexe 6](#))

Souhaitant également nous intéresser au cas de myopie sans correction optique, cette distance de 1m se justifie, puisqu'il s'agit du punctum remotum d'un œil myope, le punctum proximum lui étant à 10 cm. Ainsi, au-delà d'un mètre d'observation, ce qui est le cas pour notre expérience, les personnes myopes ne doivent pas percevoir le fond de façon nette, ce qui pourrait, peut être, affecter la perception du papillotement de la lumière. (73)

Les observateurs ont leur hauteur de siège ajustée de telle sorte qu'ils ne puissent pas percevoir la source de lumière, ni la plaque diffusante. Ainsi, seule la lumière créée de façon indirecte par les LEDs est observée. Il s'agit d'un stimulus secondaire. Ce stimulus est étendu (large) puisqu'il est réalisé par la surface observée à l'intérieur du dispositif expérimental. Comme les observateurs doivent regarder la surface de fond de la boîte face à eux, nous pouvons considérer que le stimulus est une surface plane de $0,25 \text{ m}^2$ ou dit autrement un stimulus indirect à champ large.

D'après la loi de Granit Harper (cf. Chapitre 3, II.4.c), nous aurons une meilleure sensibilité temporelle pour de grandes cibles.

Nous allons considérer le système « image-rétine » qui rappelons-le consiste en une stimulation rétinienne d'un œil stationnaire par des images alternées. Nous avons fait ce choix afin d'évaluer la gêne visuelle pouvant provenir d'un effort de fixation (par exemple : l'acuité visuelle est nécessaire à la lecture). Ainsi, il est demandé à l'observateur de regarder droit devant lui le centre du fond de la boîte uniquement, et sans tourner la tête.

Malgré le fait que ces expériences soient réalisées en laboratoire nous souhaitons nous rapprocher des conditions d'évaluations réelles d'observation du papillotement de la lumière, c'est pour cela que nous considérons la vision binoculaire et ne fixons pas le diamètre pupillaire par une pupille artificielle. Rappelons que la sommation binoculaire augmente la capacité de détecter des objets faiblement lumineux.

Ainsi, pour toutes les expériences en vision centrale, la vision est binoculaire, et nous créons un axe de 0° entre la macula et l'axe visuel. Pour les expériences en vision périphérique, c'est un peu différent. Une fois l'axe de la tête positionné aux angles d'études par rapport à la boîte expérimentale, il est demandé de ne pas tourner la tête et de fixer le regard sur un point en face d'eux, sans jamais ramener la vision vers la boîte expérimentale.

Ces éléments de positionnement de la tête et des yeux sont très importants puisque en imposant un positionnement précis et fixe des yeux, nous ne pouvons pas induire d'effets stroboscopiques liés au mouvement, et seule la composante temporelle interviendra dans nos expériences. Cependant, malgré ces précautions, des symptômes asténoscopiques peuvent survenir.

Les ouvertures pupillaires sont propres à chaque individu, aussi il sera plus à même d'effectuer des comparaisons de résultats en nous intéressant aux luminances perçues, plutôt qu'aux éclaircissements rétinien. Cependant, nous pouvons donner, à titre indicatif, un aperçu des diamètres pupillaires pour les cas extrêmes de luminances.

En résonnant sur les pics de luminance induits par le papillotement de la lumière :

- Le pic de luminance maximal est induit par le papillotement de la lumière à 20% de rapport cyclique pour le fond blanc : $L_{\max} = 388,5 \text{ cd/m}^2$

- Le pic de luminance minimal est induit par le papillotement de la lumière 90% de rapport cyclique pour le fond sombre : $L_{\min} = 3,78 \text{ cd/m}^2$

En résonnant sur les luminances moyennes L_a (« a » pour average)

- La luminance moyenne maximale est obtenue pour le fond blanc : $L_{a \max} = 77,7 \text{ cd/m}^2$
- La luminance minimale moyenne est obtenue pour le fond sombre : $L_{a \min} = 3,4 \text{ cd/m}^2$

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de diamètres pupillaires associés à ces luminances, en utilisant les deux formules de calcul de diamètre pupillaire et les éclairements rétiniens associés en Troland (Td).

| Luminances observées | Diamètre pupillaire dp calculé avec : | | Eclairage rétinien Er associé : | |
|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--|---------------------------------------|
| | La formule S.G de Groot et JW Gebhard | La formule de Y. Le Grand | Au diamètre pupillaire de S.G de Groot et JW Gebhard | Au diamètre pupillaire de Y. Le Grand |
| $L_{\max} = 388,5 \text{ cd/m}^2$ | dp min = 2,67 mm | dp min = 2,78 mm | Er = 2175, 22 Td | Er = 2358,14 Td |
| $L_{\min} = 3,78 \text{ cd/m}^2$ | dp max = 4,32 mm | dp max = 4,16 mm | Er = 55,4 Td | Er = 51,38 Td |
| $L_{a \max} = 77,7 \text{ cd/m}^2$ | dp a min = 3,08 mm | dp a min = 3,26 mm | Er = 578,91 Td | Er = 648,55 Td |
| $L_{a \min} = 3,4 \text{ cd/m}^2$ | dp a max = 4,37 mm | dp a max = 4,2 mm | Er = 50,99 Td | Er = 47,1 Td |

Figure 93 Diamètres pupillaires et éclairage rétiens extrêmes pouvant survenir durant l'expérimentation (Formules p55).

Toujours dans l'objectif d'obtenir des résultats comparables, nous n'étudions dans un premier temps que les cas des yeux emmétropes, ainsi, s'ils ont une correction optique, ils doivent la conserver. Dans le cas où une opération a réparé le problème visuel, il sera considéré que la personne a une vision saine. Pour les observateurs présentant une amétropie, et qui ont bien voulu se prêter au jeu, l'expérience a été réalisée par deux fois, une fois avec correction optique et une fois sans.

Toutes ces consignes bien appliquées, l'expérience interactive peut enfin commencer.

Une voix off explique la consigne de l'expérience et ensuite plusieurs scénarii lumineux de 5 secondes chacun sont présentés aux observateurs. Après chacun d'eux, les observateurs doivent dire s'ils ont perçu ou non la vibration de lumière. Si oui ou qu'ils ont un doute, ils appuient le bouton poussoir, si non, ils ne font rien. Il est important de considérer les réponses de doute où les observateurs ont du mal à définir s'ils perçoivent consciemment ou non le papillotement de la lumière. Ceci caractérisant avec plus de justesse la FFC de chacun comme nous le verrons par la suite.

A la fin de l'expérience leur sont posées des questions ouvertes sur leurs ressentis à propos de l'expérience, de leur vue et état de fatigue.

II. CAMPAGNES D'EXPERIMENTATIONS SUR L'ETRE HUMAIN : ETUDES PHENOMENOLOGIQUES

1. Etudes préliminaires : Papillotement de la lumière sur fond sombre et fond blanc

Problématiques : Quel est l'impact des paramètres [fréquence ; rapport cyclique] sur la perception visuelle du papillotement de la lumière ? Y a-t-il des différences si il est perçu sur fond sombre et fond blanc ? Où se situe la fréquence critique de fusion (FFC) et est elle dépendante des paramètres précédents ?

a. Expérience

Afin de répondre à cette problématique et de connaître le comportement global de perception du papillotement de la lumière perçue de façon indirecte, nous avons réalisé deux expériences. L'une en tapissant l'intérieur de la boîte expérimentale d'un fond sombre lisse, et l'autre avec un fond blanc lisse.

Le papillotement de la lumière est toujours créé par le couple [fréquence ; rapport cyclique], et les scénarii présentés balayent les fréquences de 50 à 70 Hz par pas de 5Hz, et tous les rapports cycliques de 20% à 90% par pas de 10%.

L'ordre des scénarii est présenté de façon aléatoire mais reste le même pour chaque observateur. Ci-dessous le graphe présente pour chaque cas le numéro du scénario proposé, ainsi le 1^{er} scénario est [50 Hz ; 20%], et le second est [50 Hz ; 40%], etc.

Ordre des scénarii

Rapport cyclique [%]

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 90 | 24 | 16 | 5 | 40 | 32 |
| 80 | 4 | 33 | 25 | 17 | 12 |
| 70 | 23 | 15 | 6 | 39 | 31 |
| 60 | 3 | 34 | 26 | 18 | 11 |
| 50 | 22 | 14 | 7 | 38 | 30 |
| 40 | 2 | 35 | 27 | 19 | 10 |
| 30 | 21 | 13 | 8 | 37 | 29 |
| 20 | 1 | 36 | 28 | 20 | 9 |

Fréquence [Hz]

Figure 94 Ordre des scénarii proposés

b. Résultats

Voici les résultats obtenus pour les deux fonds en pourcentage de perception :

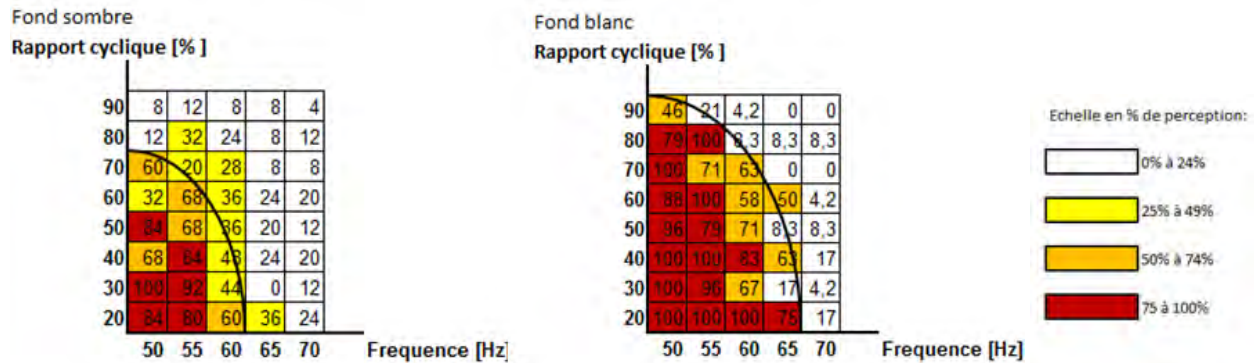


Figure 95 Résultats avec Fond sombre et Fond blanc

c. Observations

En comparant les graphiques, il apparaît que quelque soit le fond :

- plus les fréquences sont élevées et moins le papillotement de la lumière est perceptible
- plus les rapports cycliques sont faibles et plus le papillotement de la lumière est perceptible
- la valeur de la FFC varie en fonction du couple [fréquence ; rapport cyclique], et une même tendance en courbe semble caractériser la FFC pour atteindre une fréquence proche de 65Hz/70Hz pour le rapport cyclique le plus faible, soit pour de forts contrastes de luminances.

Nous constatons également que pour le fond blanc, la perception est plus catégorique et la plage de perception du papillotement de la lumière est plus grande (courbes en ½ cloche). Ceci s'expliquant par le fait que sur fond blanc, la sensibilité aux contrastes de luminances induites entre les fonds consécutivement éclairés ou non est plus grande.

Nous pouvons remarquer quelques cas qui se détachent de cette tendance tel le scénario 37 à [65Hz ; 30%] où très peu d'observateurs, voire aucun (selon le fond) ont perçu le papillotement de la lumière. Ceci ne semble pas en accord avec les cas [65Hz, 20%] et [65Hz, 40%] qui l'entourent et qui sont vus par un plus grand nombre d'observateurs.

Ainsi, en regardant plus en détail le scénario 36 proposé juste avant, nous constatons qu'il correspond à [55 Hz, 20%], pour lequel le pic de luminance induit est plus fort que dans le cas 37 et aussi pour lequel la fréquence est plus faible, l'ensemble créant un cas de papillotement de la lumière qui a été très bien détecté. Il semble donc que, dans cette expérience, le scénario précédent ait eu globalement la tendance à inhiber l'effet vibratoire de la lumière du cas 37 qui était moins intense.

L'ordre des scénarii a-t-il un impact sur la perception du papillotement de lumière (impact du cas précédent) ? Existe-t-il un effet d'accoutumance ? La fatigue visuelle joue-t-elle un rôle ?

Bilan et nouvelles problématiques

Cette expérience préliminaire nous a donc permis de révéler une tendance de perception visuelle du papillotement de la lumière en fonction du couple [fréquence ; rapport cyclique] mais a également soulevé la problématique de l'ordre des scénarii qui semblent avoir un impact sur la détection du papillotement de la lumière. Une autre question qui peut également se poser est l'impact du temps sur la détection du papillotement de la lumière. Avec le temps, l'œil ne s'habituerait-il pas à son environnement, et la sensibilité au papillotement de la lumière n'en serait-elle pas accrue ou diminuée ?

Aussi, nous avons mis en place une autre série d'expériences phénoménologiques.

2. Etudes Approfondies : Papillotement de la lumière sur différents fonds (sombre, blanc et colorés)

Problématiques 1 : L'ordre des scénarii a-t-il une influence sur la détection du papillotement de la lumière ? Et le temps impacte-t-il sur la perception visuelle du papillotement de la lumière ?

Problématiques 2 : La couleur de l'environnement a-t-elle une influence sur la perception du papillotement de la lumière ?

a. L'expérience en trois phases

De manière générale, voici l'expérience qui a été mise en place afin de répondre à ces questionnements.

Elle se subdivise en trois phases. La 1ère phase et la 3ème sont à mettre en corrélation afin de répondre à la problématique 1, alors que la 2^{de} phase traite de la problématique 2.

1^{ère} phase :

Pour la première phase, nous revenons sur le cas 37 de l'expérience préliminaire, et choisissons de proposer à l'observation les scénarii comme suit : 35 - 36 - 37 - 38, suivi d'un scénario intermédiaire et puis les mêmes scénarii dans le sens inverse. Ainsi, nous pourrions observer si l'ordre des scénarii impacte sur la réponse.

| N° scenario | Fréquence [Hz] | Rapport cyclique [%] | N° pour le sens descendant | N° pour le sens ascendant |
|-------------|----------------|----------------------|----------------------------|---------------------------|
| 35 | 55 | 40% | 1 | 9 |
| 36 | 55 | 20% | 2 | 8 |
| 37 | 65 | 30% | 3 | 7 |
| 38 | 65 | 50% | 4 | 6 |

Figure 96 Ordre des scenarii et correspondance de l'appellation dans cette expérience (sens ascendants et descendant)

3^{ème} phase :

La 3^{ème} phase consiste à répéter la phase 1, mais après 10 minutes d'observation expérimentale. Ceci nous permet de comparer les résultats de perception du papillotement de la lumière en rajoutant la notion de temps.

2^{nde} phase :

Dans cette partie, plusieurs scenarii vont être présentés aux observateurs. Les fréquences varient de 50 à 100 Hz (par fréquence ascendante) pour trois valeurs de rapports cycliques: 20%, 50% et 80%.

Sachant que les sources «courantes» de lumière vibrent généralement à 100Hz, nous voulons observer ici quel pourcentage de personnes peut la percevoir, sur une population âgée de 20 à 39 ans.

Voici l'ordre des scenarii proposés, avec un pas plus fin en fréquence aux faibles fréquences.

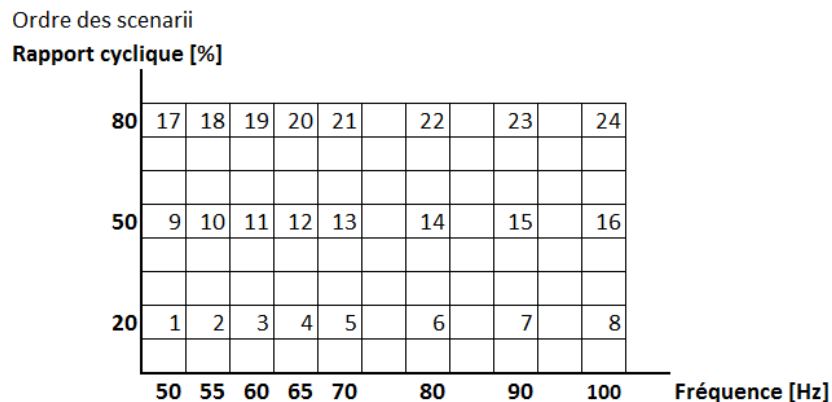


Figure 97 Ordre des scenarii présentés

L'ensemble des expériences a été réalisé en utilisant cinq fonds différents : sombre, blanc, rouge, vert et bleu. Cette restriction de couleur est intéressante si nous considérons la sensibilité aux couleurs des photorécepteurs.

La surface de fond observée a toujours un éclaircissement moyen de 167 lux, et pour chaque couleur de fond, nous avons une luminance moyenne L_a , et une luminance maximale L_{max} obtenue pour des rapports cycliques de 20%.

Voici donc les valeurs qui en découlent :

- Fond sombre : $L_a = 3,4 \text{ cd/m}^2$; $L_{\max} = 17 \text{ cd/m}^2$
- Fond blanc : $L_a = 77,7 \text{ cd/m}^2$; $L_{\max} = 388,5 \text{ cd/m}^2$
- Fond Rouge : $L_a = 15,4 \text{ cd/m}^2$; $L_{\max} = 77 \text{ cd/m}^2$
- Fond Vert : $L_a = 11,4 \text{ cd/m}^2$; $L_{\max} = 57 \text{ cd/m}^2$
- Fond Bleu : $L_a = 16,7 \text{ cd/m}^2$; $L_{\max} = 83,5 \text{ cd/m}^2$

b. Hypothèses :

En principe, grâce à nos connaissances sur le papillotement de lumière, nous nous attendons à ce que l'enchaînement d'un scénario à un autre impacte, de façon plus ou moins marquée, sur le pourcentage de détections consciente du papillotement de la lumière.

Ainsi nous nous attendrons à ce que dans le sens descendant :

- passer du scénario 1 [55Hz ; 40%] au 2 [55Hz ; 20%] devrait entraîner un plus grand nombre de détections puisque le rapport cyclique est plus faible.
- passer du scénario 2 [55Hz ; 20%] au 3 [65Hz ; 30%] devrait induire une diminution de détection : fréquence plus grande et rapport cyclique plus grand aussi.
- passer du scénario 3 [65Hz ; 30%] au 4 [65Hz ; 50%] devrait aussi diminuer puisque le rapport cyclique est plus fort.

Dans le sens ascendant :

- passer du scénario 6 [65Hz ; 50%] au 7 [65Hz ; 30%] devrait entrainer une augmentation de détection, le rapport cyclique étant diminué.
- passer du scénario 7 [65Hz ; 30%] au 8 [55Hz ; 20%] devrait induire une augmentation de détection : fréquence plus petite et rapport cyclique plus petit.
- passer du scénario 8 [55Hz ; 20%] au 9 [55Hz ; 40%] devrait entrainer une diminution de détection puisque le rapport cyclique est plus grand.

Afin d'observer rapidement si tel est le cas, un code couleur a été mis en place, si d'une phase à la suivante la détection augmente, la valeur est en vert. Elle sera en orange dans le cas contraire.

Ci-dessous la représentation de la configuration attendue :









| scenario | % vu | % vu | scenario |
|---|------|------|--|
| 1  | | | 9  |
| 2  | | | 8  |
| 3  | | | 7  |
| 4  | | | 6  |

Figure 98 Hypothèse des variations de détection des scénarii de papillotement de lumière

c. Les résultats et observations des première et troisième phases

➤ **Fond sombre :**

| 1 ^{ère} phase – Fond Sombre | | | | | |
|--|------|------|----------|-----------------------------|-------|
| Scenario | % Vu | % Vu | scenario | Variation %Vu selon ordre % | |
| 1 | 12 | 19 | 9 | 7 | 7 |
| 2 | 19 | 42 | 8 | 23 | 23 |
| 3 | 15 | 15 | 7 | 0 | 0 |
| 4 | 8 | 4 | 6 | -4 | -4 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 1 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | | 13,75 |

| 3 ^{ème} phase – Fond Sombre | | | | | |
|--|------|------|----------|-----------------------------|-------|
| Scenario | % Vu | % Vu | scenario | Variation %Vu selon ordre % | |
| 1 | 35 | 4 | 9 | -34 | -34 |
| 2 | 42 | 46 | 8 | 4 | 4 |
| 3 | 23 | 35 | 7 | 12 | 12 |
| 4 | 19 | 12 | 6 | 31 | 31 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 3 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | | 20,25 |
| Ecart d'erreur % vu ordre et temps (Erreur phase 3- erreur phase 1) | | | | | 6,5 |

| Comparaisons avec le temps (Phase 3-Phase1) - Fond Sombre | | | | |
|--|--------------------------------|--------------------------------|----------|---|
| Scenario | Variation % Vu avec le temps % | Variation % Vu avec le temps % | Scenario | Erreur globale sur le temps quelque soit l'ordre (\sum variations % vu temps) / nb scenarii |
| 1 | 23 | -15 | 9 | 13,25 |
| 2 | 17 | 4 | 8 | |
| 3 | 8 | 20 | 7 | |
| 4 | 11 | 8 | 6 | |

Figure 99 Résultats fond sombre : à gauche résultats 1ère et 3ème phase, à droite comparaison entre les deux phases

➤ **Fond blanc :**

| 1 ^{ère} phase – Fond Blanc | | | | | |
|--|------|------|----------|-----------------------------|------|
| Scenario | % vu | % vu | Scenario | Variation %Vu selon ordre % | |
| 1 | 82 | 96 | 9 | 14 | 14 |
| 2 | 86 | 96 | 8 | 10 | 10 |
| 3 | 29 | 50 | 7 | 21 | 21 |
| 4 | 11 | 36 | 6 | 25 | 25 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 1 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | | 17,5 |

| 3 ^{ème} phase - Fond Blanc | | | | | |
|--|------|------|----------|-----------------------------|-------|
| scenario | % vu | % vu | scenario | Variation %Vu selon ordre % | |
| 1 | 93 | 82 | 9 | -11 | -11 |
| 2 | 93 | 96 | 8 | 3 | 3 |
| 3 | 21 | 54 | 7 | 33 | 33 |
| 4 | 14 | 32 | 6 | 18 | 18 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 3 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | | 16,25 |
| Ecart d'erreur % vu ordre et temps (Erreur phase 3- erreur phase 1) | | | | | -1,25 |

| Comparaisons avec le temps (Phase 3-Phase1) - Fond Blanc | | | | |
|---|--------------------------------|--------------------------------|----------|---|
| Scenario | Variation % Vu avec le temps % | Variation % Vu avec le temps % | Scenario | Erreur globale sur le temps quelque soit l'ordre (\sum variations % vu temps) / nb scenarii |
| 1 | 11 | -14 | 9 | 6,375 |
| 2 | 7 | 0 | 8 | |
| 3 | -8 | 4 | 7 | |
| 4 | 3 | -4 | 6 | |

Figure 100 Résultats fond blanc : à gauche résultats 1ère et 3ème phase, à droite comparaison entre les deux phases

➤ **Fond rouge :**

| 1 ^{ère} phase – Fond Rouge | | | | |
|---|------|------|----------|-----------------------------|
| scenario | % vu | % vu | scenario | Variation %Vu selon ordre % |
| 1 | 92 | 92 | 9 | 0 |
| 2 | 92 | 92 | 8 | 0 |
| 3 | 44 | 36 | 7 | -8 |
| 4 | 24 | 32 | 6 | 8 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 1 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | 4 |

| 3 ^{ème} phase – Fond Rouge | | | | |
|---|------|------|----------|-----------------------------|
| scenario | % vu | % vu | scenario | Variation %Vu selon ordre % |
| 1 | 100 | 88 | 9 | -12 |
| 2 | 96 | 92 | 8 | -4 |
| 3 | 40 | 32 | 7 | -8 |
| 4 | 16 | 20 | 6 | 4 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 3 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | 8 |
| Ecart d'erreur % vu ordre et temps (Erreur phase 3- erreur phase 1) | | | | 4 |

| Comparaisons avec le temps (Phase 3-Phase1) - Fond Rouge | | | | |
|--|--------------------------------|--------------------------------|----------|---|
| Scenario | Variation % Vu avec le temps % | Variation % Vu avec le temps % | Scenario | Erreur globale sur le temps quelque soit l'ordre (\sum variations % vu temps) / nb scenarii |
| 1 | 8 | -4 | 9 | 5,5 |
| 2 | 4 | 0 | 8 | |
| 3 | -4 | -4 | 7 | |
| 4 | -8 | -12 | 6 | |

Figure 101 Résultats fond rouge : à gauche résultats 1ère et 3ème phase, à droite comparaison entre les deux phases

➤ **Fond vert**

| 1 ^{ère} phase – Fond Vert | | | | |
|---|------|------|----------|-----------------------------|
| Scenario | % vu | % vu | scenario | Variation %Vu selon ordre % |
| 1 | 52 | 74 | 9 | 22 |
| 2 | 78 | 91 | 8 | 13 |
| 3 | 17 | 35 | 7 | 18 |
| 4 | 13 | 26 | 6 | 13 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 1 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | 16,5 |

| 3 ^{ème} phase – Fond Vert | | | | |
|---|------|------|----------|-----------------------------|
| scenario | % vu | % vu | scenario | Variation %Vu selon ordre % |
| 1 | 87 | 74 | 9 | -13 |
| 2 | 87 | 91 | 8 | 4 |
| 3 | 17 | 17 | 7 | 0 |
| 4 | 13 | 4 | 6 | -9 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 3 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | 6,5 |
| Ecart d'erreur % vu ordre et temps (Erreur phase 3- erreur phase 1) | | | | -10 |

| Comparaisons avec le temps (Phase 3-Phase1) - Fond Vert | | | | |
|---|--------------------------------|--------------------------------|----------|---|
| Scenario | Variation % Vu avec le temps % | Variation % Vu avec le temps % | Scenario | Erreur globale sur le temps quelque soit l'ordre (\sum variations % vu temps) / nb scenarii |
| 1 | 35 | 0 | 9 | 10,5 |
| 2 | 9 | 0 | 8 | |
| 3 | 0 | -18 | 7 | |
| 4 | 0 | -22 | 6 | |

Figure 102 Résultats fond vert : à gauche résultats 1ère et 3ème phase, à droite comparaison entre les deux phases

➤ **Fond bleu :**

| 1 ^{ère} phase – Fond Bleu | | | | |
|--|------|------|----------|-----------------------------|
| Scenario | % vu | % vu | scenario | Variation %Vu selon ordre % |
| 1 | 83 | 96 | 9 | 13 |
| 2 | 83 | 100 | 8 | 17 |
| 3 | 17 | 29 | 7 | 12 |
| 4 | 8 | 17 | 6 | 9 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 1 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | 12,75 |

| 3 ^{ème} phase – Fond Bleu | | | | |
|--|------|------|----------|-----------------------------|
| scenario | % vu | % vu | scenario | Variation %Vu selon ordre % |
| 1 | 96 | 79 | 9 | -17 |
| 2 | 100 | 96 | 8 | -4 |
| 3 | 17 | 33 | 7 | 16 |
| 4 | 13 | 17 | 6 | 4 |
| Erreur moyenne % vu ordre phase 3 (\sum variations % vu) / nb variations | | | | 10,25 |
| Ecart d'erreur % vu ordre et temps (Erreur phase 3- erreur phase 1) | | | | -2,5 |

| Comparaisons avec le temps (Phase 3-Phase1) - Fond Bleu | | | | |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|---|
| Scenario | Variation % Vu phase 3 - % Vu phase 1 | Variation % Vu phase 3 - % Vu phase 1 | Scenario | Erreur globale sur le temps quelque soit l'ordre (\sum variations % vu temps) / nb scenarii |
| 1 | 13 | -17 | 9 | 7,5 |
| 2 | 17 | -4 | 8 | |
| 3 | 0 | 4 | 7 | |
| 4 | 5 | 0 | 8 | |

Figure 103 Résultats fond bleu : à gauche résultats 1^{ère} et 3^{ème} phase, à droite comparaison entre les deux phases

➤ Bilan quelle que soit la couleur de l'environnement observé :

| | |
|--|---------|
| Moyenne des erreurs globales avec le temps pour tous les fonds | 8,66 % |
| Moyenne des erreurs de détections selon l'ordre phase 1 pour toutes les couleurs | 12,9 % |
| Moyenne des erreurs de détections selon l'ordre phase 3 pour toutes les couleurs | 12,25 % |
| Ecart des erreurs en considérant l'ordre et le temps pour toutes les couleurs | 0,65% |

Figure 104 Tableau bilan présentant les erreurs de détection

d. Observations et interprétations première et troisième phases

Variations de détection du papillotement de la lumière par passage d'un scénario au suivant

Nous constatons que les hypothèses formulées précédemment ont tendance à se vérifier pour tous les cas.

Nous remarquons également que passer du cas 2 au 3 se caractérise par une très grande diminution de détection. De même, passer du cas 7 au 8 se caractérise par une très grande augmentation de détection.

Dans tous les scenarii, il y a un changement de rapport cyclique, mais seulement lorsque la fréquence change, les pourcentages de détection sont plus forts. Ceci laisse penser qu'une variation

de fréquence de 10Hz prédomine sur notre rapport cyclique qui dans notre cas ne varie que de 10%.

Remarque : aucun cas ne fait apparaître à nouveau une valeur nulle pour le scénario 3, contrairement à ce que nous avons pu constater lors de la 1^{ère} expérience.

Variation de détection d'un même scénario de papillotement de la lumière selon l'ordre de présentation des scénarii : descendant /ascendant et le temps

Dans les tableaux, la variation de détection d'un même scénario est indiquée par la colonne : « Variation %Vu selon ordre % ». Un code couleur est aussi instauré : en rouge une variation négative entre ordre descendant et ascendant, en bleu marine dans le cas contraire.

Phase 1 :

Nous constatons de manière générale qu'il y a une détection plus grande du papillotement de la lumière lorsque les scénarii sont proposés dans l'ordre ascendant. Le papillotement de la lumière d'un cas précédent a donc une influence sur la détection du papillotement de la lumière du cas suivant, ceci étant peut être dû à un effet de rémanence du cas précédent observé. Selon les couleurs de fond, les pourcentages varient, mais aucune explication commune ne permet de comprendre les différences de valeurs (pas de lien explicite avec la luminance du fond, ni les caractéristiques des cônes (en nombre et sensibilité)).

Remarque : Un effet de rémanence se traduit par un maintien dans le temps des effets d'une action ou d'un phénomène terminé.

Phase 3 :

Après 10 minutes d'observation du papillotement de la lumière, les mêmes scénarii qu'en phase 1 sont proposés à l'observation. Cette fois-ci, l'ordre des scénarii ne semble pas impacter de la même manière sur la détection, et pour presque la moitié des cas, l'ordre ascendant sera moins bien vu. Il est difficile de conclure, cependant, au regard des tableaux, il se trouve que pour tous les fonds, le dernier cas présenté (scénario 9 équivalent au 1), présente des pourcentages négatifs. Et, les pourcentages de non détection sont d'autant plus forts que la luminance du fond est petite.

Il semble que cela soit révélateur d'une accoutumance à l'observation du contraste de luminance mais également d'une fatigue visuelle au cours du temps.

Remarque : pour un même couple [fréquence ; rapport cyclique], nous avons les rapports de luminances L suivants : $L_{\text{blanc}} > L_{\text{bleu}} > L_{\text{rouge}} > L_{\text{vert}} > L_{\text{sombre}}$.

En analysant le tableau bilan, indépendamment des couleurs de fond, il apparaît que de manière générale l'ordre de présentation des scénarii impacte de la même façon en phase 1 qu'en phase 3 avec seulement 0,65% d'écart sur les réponses après un temps de 10 minutes, ce qui est négligeable.

Ainsi, la composante temporelle ne semble pas affecter notre interprétation de l'ordre des scénarii de papillotement de la lumière.

Variation de détection du papillotement de la lumière pour un même scénario avec le temps

Dans cette partie, nous faisons abstraction de l'ordre des scénarii pour ne s'intéresser qu'à la composante temporelle. Il s'agit du 3^{ème} tableau sur la droite présenté dans les résultat pour chaque couleur de fond.

Les erreurs de détection de chaque scénario avec le temps sont plus fortes pour les fonds sombre et vert. Les autres fonds ont des erreurs plus faibles et proches en valeur. Il est difficile de conclure. Aucune réelle logique évidente en relation avec les luminances ou les caractéristiques en nombre et sensibilité des photorécepteurs n'apparaît.

En analysant maintenant la moyenne des erreurs globales de détection du papillotement de la lumière avec le temps pour tous les fonds, dans le tableau bilan, nous réalisons qu'elle est relativement faible et ne représente en fait que 8,66% (Figure 104).

Nos réponses expérimentales doivent donc être considérées à + ou - 8,66% d'erreurs. Ces erreurs pouvant s'expliquer par le facteur neuro-psycho-physiologique impliqué dans la réponse.

e. Les résultats seconde phase

Cette expérience mérite que nous nous y attardions plus amplement, car elle révèle des variations de FFC en fonction de la couleur du fond. Nous allons plus particulièrement nous intéresser au pourcentage de détection du papillotement de la lumière qui dépend du rapport cyclique et du spectre émis par le fond éclairé par notre LED.

- Pour élément de comparaison, voici le spectre de notre LED, dont le pic principal est à 616 nm et la longueur d'onde dominante à 581 nm.

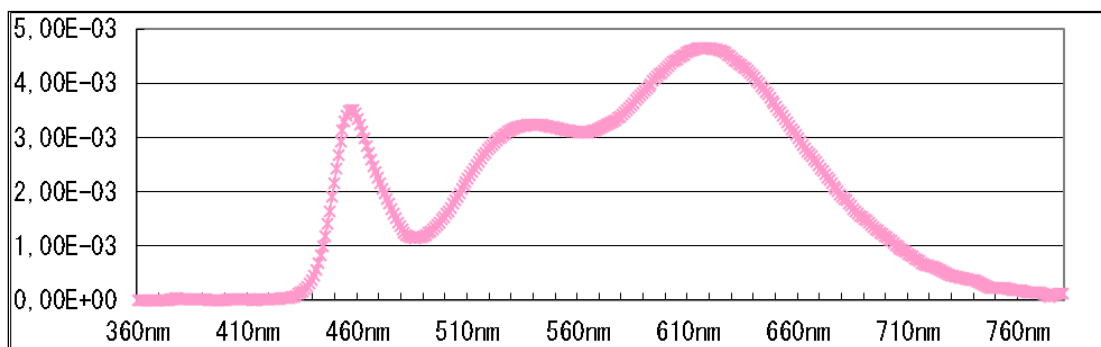


Figure 105 Spectre d'émission de la LED utilisée dans l'expérience

- Pour le fond sombre, le spectre montre un pic à 702nm, et une longueur d'onde dominante à 582 nm.

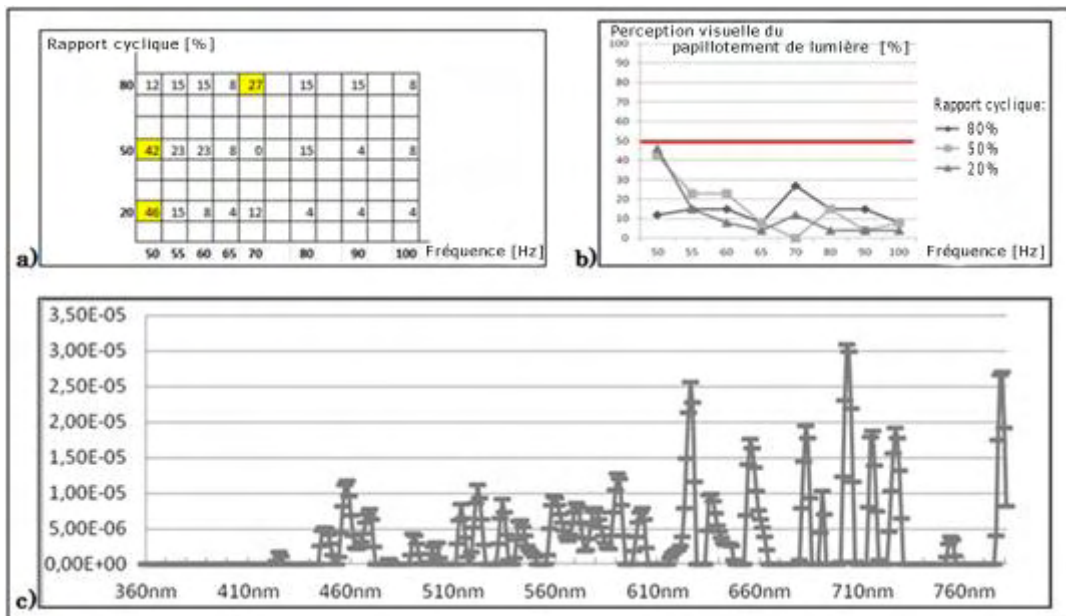


Figure 106 Résultats pour le fond sombre : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED.

- Pour le fond blanc, le spectre montre un pic à 625 nm, et une longueur d'onde dominante à 584 nm.

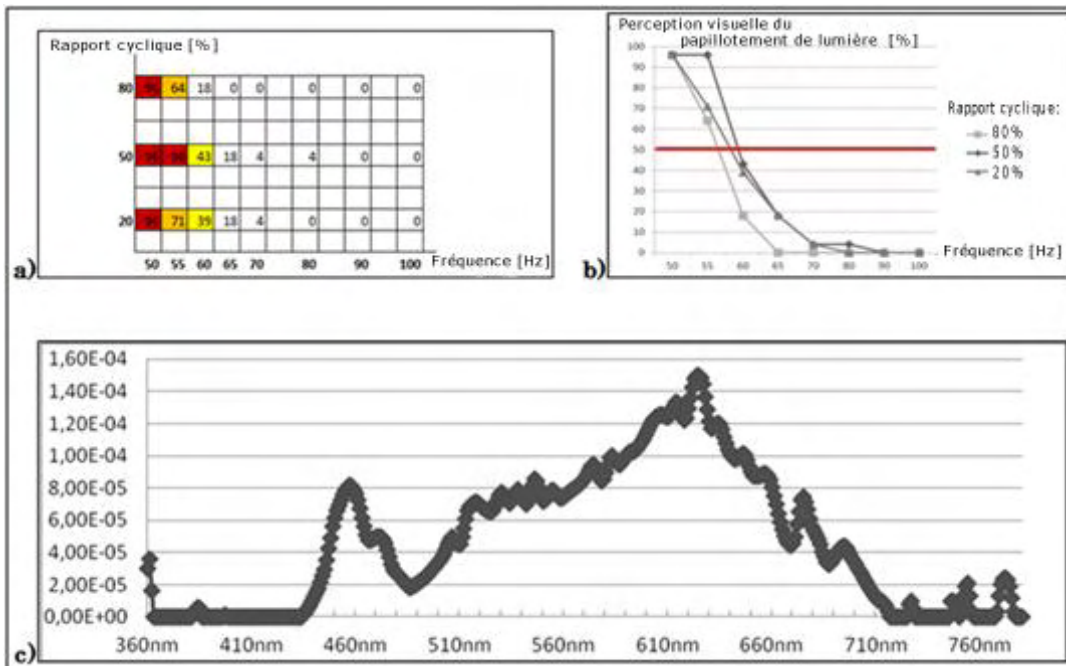


Figure 107 Résultats pour le fond blanc : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED.

- Pour le fond rouge, le spectre montre un pic à 638 nm, et une longueur d'onde dominante à 613 nm.

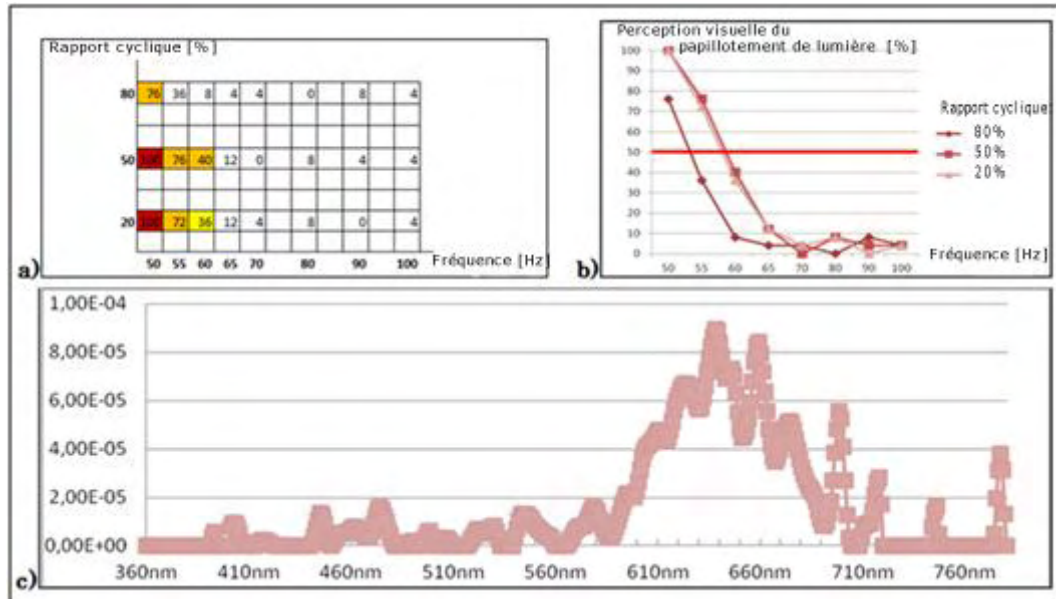


Figure 108 Résultats pour le fond rouge : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED.

- Pour le fond vert, le spectre montre un pic à 542 nm, et une longueur d'onde dominante à 550 nm.

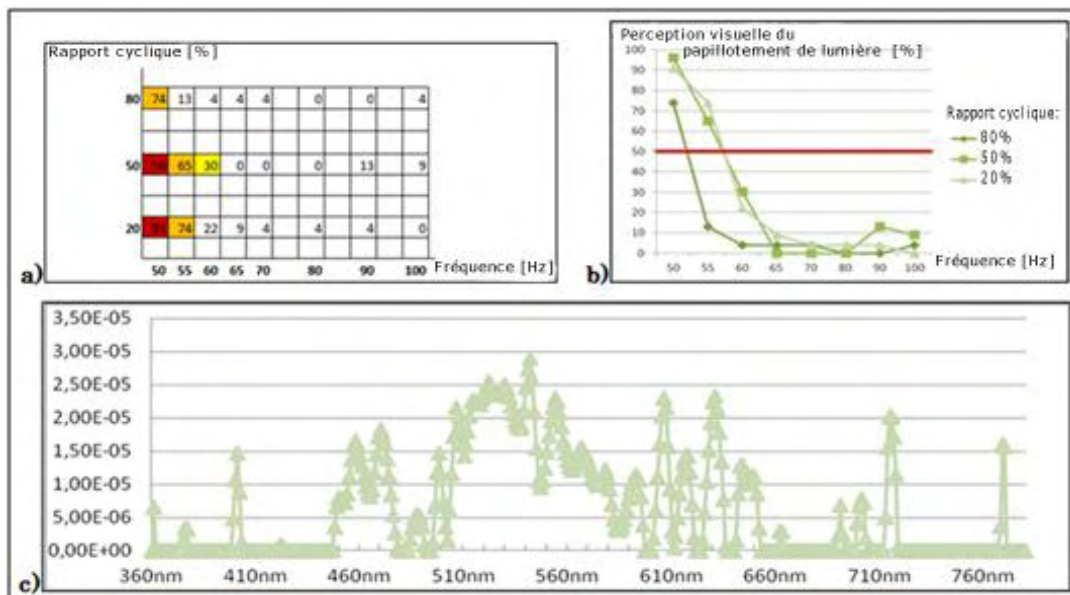


Figure 109 Résultats pour le fond vert : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED.

- Pour le fond bleu, le spectre montre un pic à 523 nm, et une longueur d'onde dominante à 510 nm.

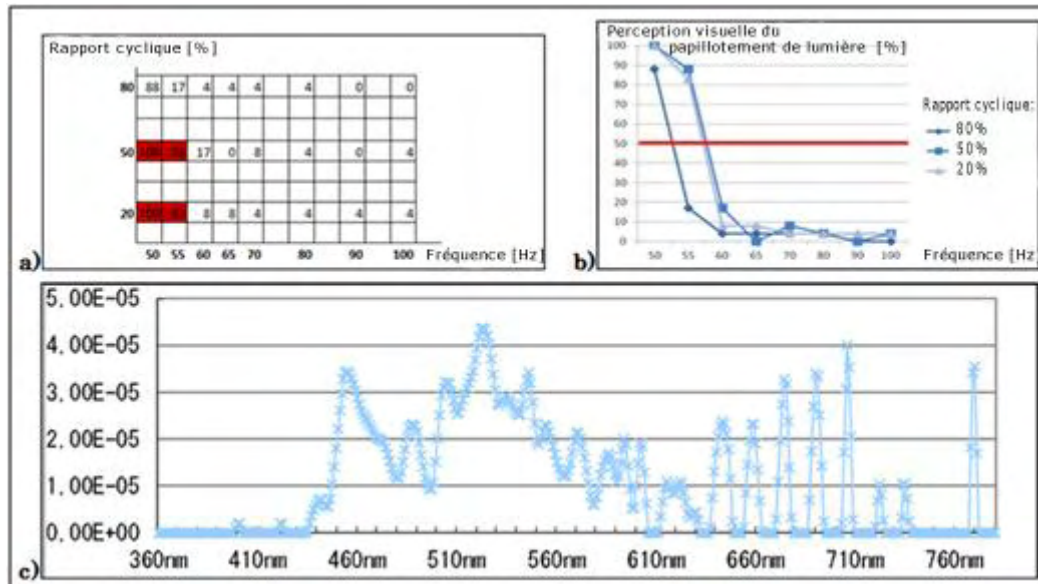


Figure 110 Résultats pour le fond bleu : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED.

f. Observations et interprétations de la seconde phase

Comme résultat général, nous observons les mêmes grandes tendances que précédemment pour toutes les couleurs de fond :

- Quand la fréquence augmente, le papillotement de la lumière est difficile à percevoir.
- Le rapport cyclique a également un fort impact (à fréquence constante) et plus il diminue et plus facile en sera la perception du papillotement de la lumière. Ceci peut être expliqué par le fait que les contrastes de luminances sont plus forts pour de plus petits pourcentages de rapport cyclique.
- Un nouveau résultat est que la couleur de fond impacte, en plus de la fréquence et du rapport cyclique, sur les valeurs de la FFC.

Dans cette analyse, nous allons considérer la FFC moyenne que nous nommerons FFCa qui représente la FFC obtenue pour 50% des observateurs. (cf. la ligne rouge sur les graphiques b) présentés précédemment)

Dans un premier temps, observons ce qu'il en est pour chaque fond :

- Pour le fond sombre, il est difficile de conclure à propos des valeurs de la FFC. Les observateurs doutaient de leurs observations et leurs réactions ont été mitigées. Cela est dû aux contrastes faibles de luminance qui mettent notre vision en fonction à la fois en mésopique et photopique.

➤ Pour le fond blanc, la FFCa varie autour de 60 Hz quel que soit le rapport cyclique. Les réponses sont plus catégoriques et la plage de perception du papillotement de la lumière est assez grande. Les longueurs d'ondes atteignant nos yeux sont semblables à celles émises par les LEDs, mais atténuées.

➤ Pour les fonds de couleur, la même tendance se dessine pour la valeur de la FFCa. En effet, les courbes obtenues pour un rapport cyclique de 20% et 50% sont similaires et donnent une FFCa autour de 60Hz. Alors que la courbe pour un rapport cyclique de 80% diminue jusqu'à une FFCa à environ 55Hz. Ainsi, les contrastes les plus bas sont moins visibles, et deux résultats pour la FFCa sont obtenus, contrairement au fond blanc.

Afin de compléter nos observations, il est important de considérer la réponse des photorécepteurs rétiniens.

Voici donc un rapide rappel physiologique. Il existe 3 types de cônes, qui sont situés au centre de la rétine sur la fovéa, et quelques cônes sont situés sur la périphérie de la rétine avec les bâtonnets.

- Les Cyanolabes ou cônes S (Small) ont un pic d'absorption à 425 nm. Ce qui signifie que leur réponse est centrée dans le bleu. Ils sont plus sensibles à la lumière, mais représentent seulement 4% du nombre total des cônes.
- Les Chlorolabes ou cônes M (Medium) ont un pic d'absorption à 535 nm. Leur réponse est centrée dans le vert. Ils représentent 32% du nombre total des cônes.
- Les Erythrolabes ou cônes L (Long) ont un pic d'absorption à 565 nm, et leur réponse est centrée dans le rouge. Ils sont moins sensibles à la lumière, compensant cela par leur très grand nombre : 64% des cônes. (74)

Ceci se caractérise par la courbe de sensibilité propre à chaque cône :

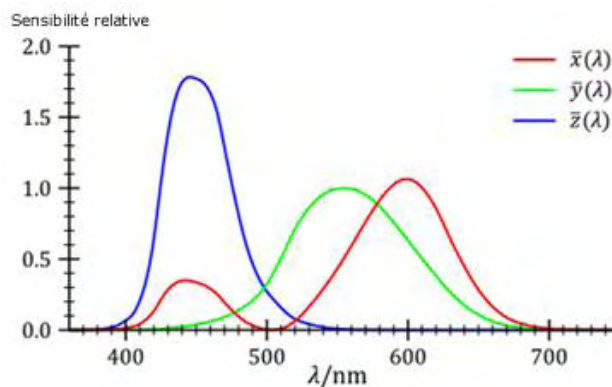


Figure 111 La sensibilité des cônes en fonction de la longueur d'onde (CIE 1931)

Revenons maintenant à nos interprétations :

➤ Les résultats obtenus pour les fonds vert et rouge sont du même ordre de grandeur, en dépit de luminances induites quelque peu différentes.

➤ Si nous regardons le spectre émis par le fond rouge par rapport à la sensibilité des cônes, nous voyons que la longueur d'onde dominante est à 613nm, pas si loin du pic d'absorption des cônes L. Nous pouvons donc considérer que les réponses obtenues pour la perception du papillotement de la lumière avec le fond rouge sont principalement dues à la réponse des cônes L.

➤ Pour le fond vert, le spectre montre une longueur d'onde dominante de 550nm, tandis que la sensibilité des cônes M a un pic d'absorption à 535 nm. A cette longueur d'onde dominante les deux cônes L et M vont répondre. Il est difficile de savoir quelle réponse de cône prédomine puisque les cônes M sont moins nombreux mais plus sensibles à la lumière et les cônes L sont plus nombreux, mais moins sensibles à la lumière.

➤ Le fond bleu est un cas particulier.

En effet, nous avons choisi un fond bleu qui, lorsqu'il est éclairé par notre LED, produit un spectre dont la longueur d'onde dominante d'émission se situe dans la zone de chevauchement de la réponse des trois types de cônes (510nm).

Nous remarquons également que seuls les contrastes de luminance les plus forts sont perçus par presque tous les observateurs (20% et 50% de rapport cyclique à 50Hz et 55Hz), tandis que les autres cas de papillotement de la lumière sont légèrement détectés.

De plus, si nous nous intéressons aux niveaux de luminance du fond bleu, nous remarquons qu'ils sont similaires à ceux du fond rouge. Ceci aurait pu nous faire penser que les pourcentages de détection du papillotement de la lumière seraient les mêmes, mais en réalité, il s'avère que les résultats avec le fond rouge sont plus progressifs.

Si nous regardons le spectre d'émission du fond bleu, nous constatons qu'il est très proche de celui du fond vert, ceci dû en particulier à son spectre dominant qui est 510 nm (vert). Cependant, ici encore, les résultats de détection du papillotement de la lumière sont différents. Outre les réponses spécifiques de chaque type de cône, nous constatons que les valeurs des luminances semblent corrélées au pourcentage de détection du papillotement de la lumière. Nous avons : $L_{\text{blanc}} > L_{\text{bleu}} > L_{\text{rouge}} > L_{\text{vert}} > L_{\text{sombre}}$, et la quantité de détection D semble suivre cette tendance : $D_{\text{blanc}} > D_{\text{bleu}} > D_{\text{rouge}} > D_{\text{vert}} > D_{\text{sombre}}$.

g. Bilan seconde phase

Nous venons donc de voir qu'il y a un impact de la couleur de l'environnement sur la perception visuelle du papillotement de la lumière, observé en vision centrale, avec le même niveau d'éclairement pour tous les cas étudiés.

Les résultats semblent rattachés aux types de cônes qui sont principalement mis en jeu. Considérant la sensibilité spectrale des cônes, la détection du papillotement de la lumière par les observateurs sera quelque peu différente, les résultats les plus surprenants étant obtenus pour le fond bleu pour lequel la réponse aux trois types de cônes est sollicitée.

Il semble donc que la détection du papillotement de la lumière ne dépende pas seulement de la fréquence, ni des luminances, ni du spectre d'émission mais également de l'action conjointe des cônes mis en jeu lors de la réponse.

h. Résultats et analyse seconde phase dans le cas d'amétropies.

Parmi les observateurs, certains ont bien voulu réitérer l'expérience en ne portant pas de correction optique. Ceci nous permet d'effectuer des comparaisons de perception visuelle du papillotement de la lumière selon l'amétropie et selon le port ou non de la correction optique, sur fond blanc et sur fond sombre.

Cependant, le nombre d'observateurs étant très faibles (inférieur à 10 individus), les résultats sont plutôt à considérer comme des tendances, et nécessiteraient un plus grand nombre d'observateurs pour être révélateurs d'une réalité.

Voici toutefois les résultats obtenus, pour fond sombre et fond blanc, pour le cas de personnes atteintes d'une amétropie : la myopie, et dans le cas de personnes atteintes à la fois de deux amétropies : astigmatisme et myopie.

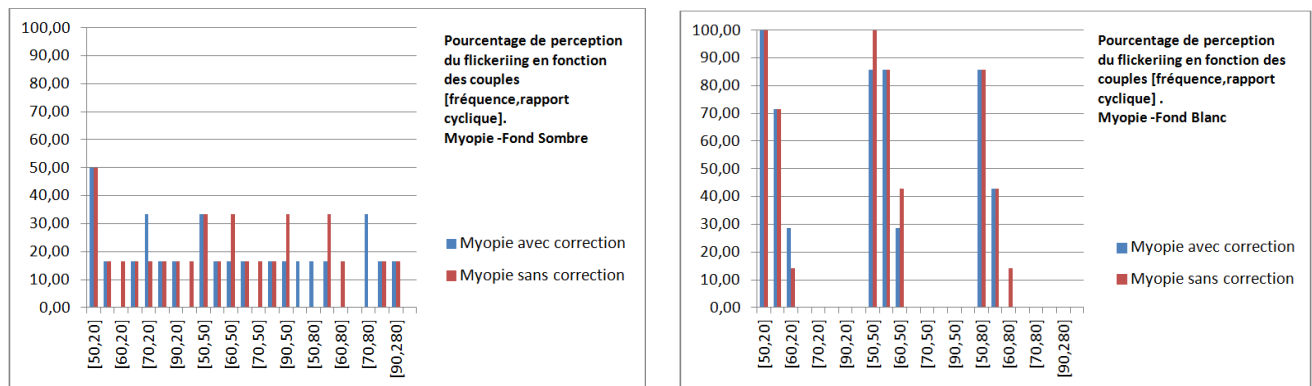


Figure 112 Résultats expérimentaux pour des personnes atteintes de myopie – Cas du fond sombre et du fond blanc

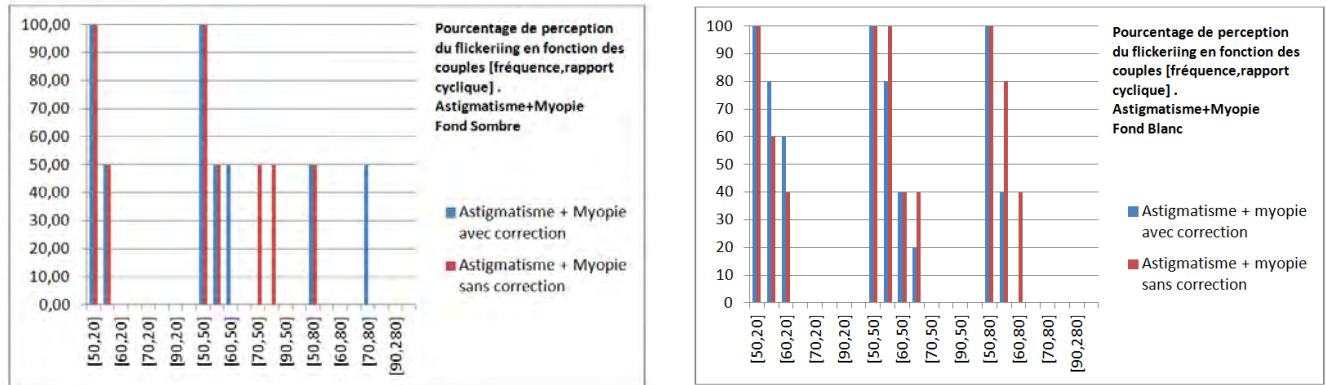


Figure 113 Résultats expérimentaux pour des personnes atteintes d'astigmatisme et myopie– Cas du fond sombre et du fond blanc

De part nos conditions expérimentales, pour ces deux cas, le fond observé est vu de manière floue, mais cela ne devrait pas avoir d'impact puisque la surface de fond est éclairée de façon uniforme et qu'aucun objet n'est à observer.

Remarque : nous n'avons pas pu connaître les caractéristiques exactes des amétropies n'ayant pas d'appareils de mesure à notre disposition, et les observateurs n'ayant pas tous accès à leur bilan ophtalmologique.

Il est difficile de conclure sur les résultats, mais nous constatons que :

- la perception sur fond sombre est toujours plus faible que sur fond blanc, quelle que soit l'amétropie (myopie/ astigmatisme+myopie). Mais dans le cas précis de la myopie, les écarts sont beaucoup plus marqués.
- Sur fond blanc quelle que soit l'amétropie (myopie et astigmatisme+myopie) une tendance commune apparaît :
 - à partir du moment où les scénarii ont un rapport cyclique supérieur à 20%, la détection semble plus forte sans correction optique,
 - la plage de détection sans correction optique est plus élevée à haute fréquence et haut rapport cyclique qu'avec correction optique. Ainsi, la courbe FFC n'a pas la même courbure,
 - A partir du scénario [65Hz, 80%] il n'y a plus de détection consciente du papillotement de la lumière.
- Sur fond sombre, quelle que soit l'amétropie (myopie et astigmatisme+myopie) :
 - il semble que la détection sans correction optique est plus forte pour des cas principalement à 50% de rapport cyclique,
 - et avec correction optique le cas [70Hz, 80%] est perçu à l'unanimité.
- Sur fond sombre, les variations de détections avec et sans correction optique ne sont pas situées sur les même scénarii, ni en même quantité, que l'on soit atteint de myopie ou astigmatisme+ myopie :

- dans le cas astigmatisme+myopie, pour le fond sombre nous avons eu très peu d'observateurs ce qui justifie que les réponses sont plus tranchées. Ainsi il est difficile de conclure sur ce cas,
- Dans le cas de la myopie, une dominante de réponses équivalentes apparaît que l'on soit avec ou sans correction optique.

3. Etudes Approfondies : Papillotement de la lumière et axes de perception visuelle

a. Les expériences

L'expérience est la même que précédemment, sauf que les scénarii sont présentés suivant différents axes de perception visuelle :

- Axe 0° : il s'agit de la perception visuelle centrale ou fovéale, où les observateurs fixent le fond de la boîte. La vision est binoculaire
- Axe 45°: les observateurs sont placés à 45° de la boîte et fixent le mur en face d'eux et non le centre du dispositif expérimental. Ils ne doivent pas tourner le regard vers la boîte durant l'expérience. Il s'agit de vision périphérique où il est encore possible de voir en vision binoculaire
- Axe 90° : les observateurs sont placés perpendiculairement à la boîte. Il s'agit à nouveau de vision périphérique, où la vision est monoculaire.

b. Résultats pour le fond sombre

Pourcentages de détection du papillotement de la lumière pour chaque angle de perception:

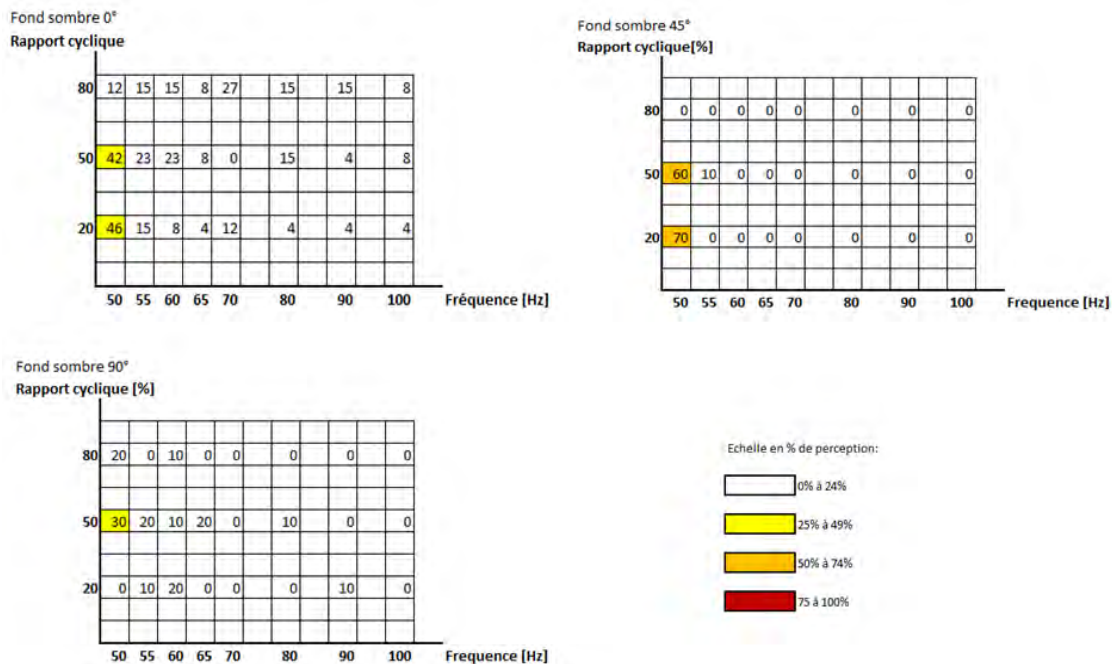


Figure 114 Résultats de perception visuelle du papillotement de la lumière sur fond sombre à 0°, 45° et 90°

c. Résultats pour le fond blanc

Pourcentages de détection du papillotement de la lumière pour chaque angle de perception:

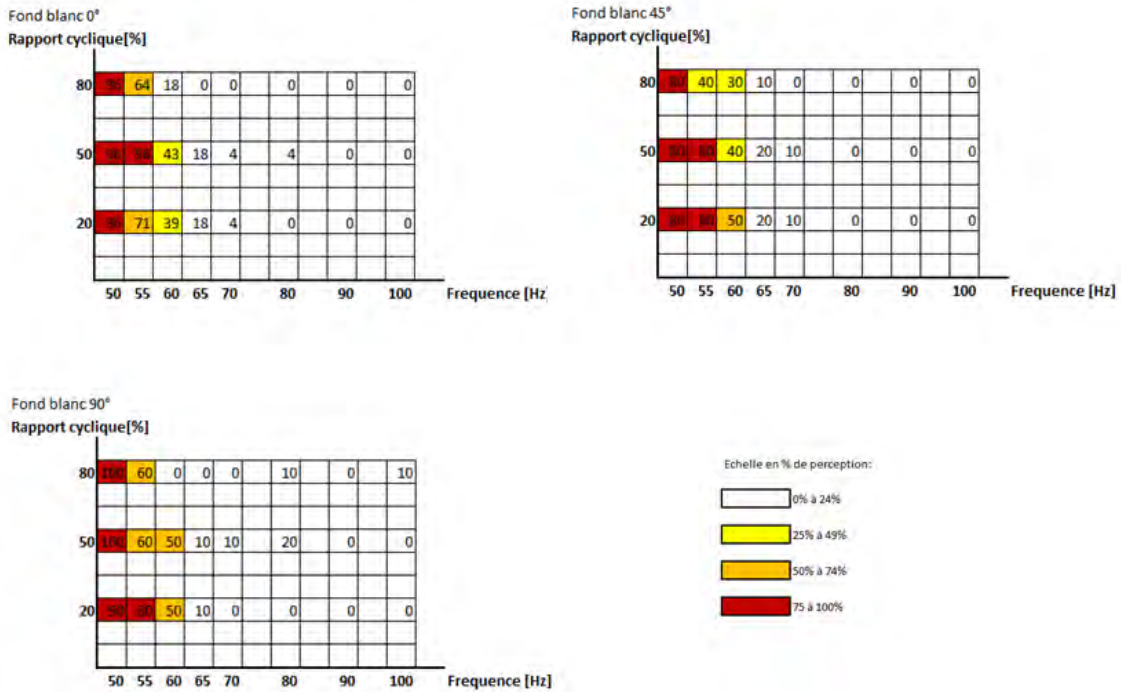


Figure 115 Résultats de perception visuelle du papillotement de la lumière sur fond blanc à 0°, 45° et 90°

d. Analyse des résultats

Suite aux résultats expérimentaux, nous constatons que :

- En vision périphérique (45° et 90°), peu de cas de papillotement de la lumière sont perçus pour le fond sombre, tout comme en vision centrale.
- la plage de détection du papillotement de la lumière en vision périphérique pour le fond blanc est bien plus importante que sur fond sombre, tout comme dans le cas de la vision centrale (0°).

Ces remarques comparatives entre fond sombre et fond blanc sont en accord avec la théorie. Dans le cas de la vision périphérique, ce sont les cônes situés en périphérie rétinienne qui sont principalement mis en jeu.

Il est également intéressant de remarquer les différences de réponses selon l'axe de perception visuelle :

- dans le cas du fond sombre, présentant des contrastes de luminances faibles, la perception la plus forte du papillotement de la lumière est obtenue pour l'axe à 45°, nous observons donc ici un fort impact de la vision binoculaire encore permise à 45°. Et à 90°, plus de scénarii semblent perçus, mais dans des pourcentages de détection un peu plus faibles. Cependant, de part les notions empiriques, nous nous attendions à ce que le papillotement de la lumière soit mieux détecté aux basses luminances en périphérie que dans la fovéa.
- Dans le cas du fond blanc, présentant des contrastes de luminances plus forts, c'est différent. La détection du papillotement de la lumière est de plus en plus forte plus l'axe de perception augmente.

Remarque : cette étude sur les axes de perception est intéressante à considérer puisqu'elle peut se transposer au cas d'un automobiliste dans sa voiture, en train d'observer la route, qui est éclairée par des luminaires LEDs en bordure de route. Cependant nous considérons ici une première phase où la voiture est encore statique.

4. Méthode d'optimisation

a. Les problématiques

A l'issue des expériences précédentes, tant sur la thématique de la perception visuelle du papillotement de la lumière selon la couleur de l'environnement, que sur la perception visuelle du papillotement de la lumière selon l'axe de perception, de nouvelles problématiques ont émergé, et ont nécessité une analyse algorithmique.

Problématiques 1:

Quels sont les couples [Fréquence; Rapport cyclique] optimaux à considérer quelle que soit la couleur de l'environnement, pour que le papillotement de la lumière ne soit pas perçu consciemment ?

Problématiques 2 :

Quels sont les couples [Fréquence; Rapport cyclique] optimaux quel que soit l'axe de perception du fond, pour que le papillotement de la lumière ne soit pas perçu consciemment ? Nous nous intéresserons aux résultats obtenus pour le fond sombre, puis à ceux du fond blanc, et enfin nous couplerons les résultats des fonds sombre et blanc.

Pour cela, nous avons utilisé la méthode d'optimisation multi-critère Villa et Labayrade de 2013 (75) (76).

b. Définition de la méthode d'optimisation

Une méthode d'optimisation permet de rechercher le minimum d'une fonction mathématique g , appelée fonction critère. Il s'agit d'identifier les valeurs des variables de décision x pour lesquelles la fonction $g(x)$ est minimum.

Remarque : Si le maximum d'une fonction g est recherchée, il s'agit de rechercher le minimum de l'opposée $(-g)$. Dans la suite, nous parlerons donc d'optimum (maximum ou minimum).

Si g est scalaire, le problème d'optimisation est dit mono-critère, et la méthode recherche un unique optimum. Si g est vectorielle (ensemble de plusieurs fonctions critères), il s'agit d'un problème d'optimisation multi-critère.

De manière générale, il existe plusieurs méthodes pour rechercher un optimum. Elles sont fondées sur différentes approches :

- L'approche énumérative ;
- L'approche déterministe ;
- L'approche stochastique.

Dans notre expérience, les propriétés mathématiques des fonctions critères sont inconnues, seules les valeurs prises par les fonctions critères sont disponibles. Par conséquent, l'approche stochastique sera employée. De plus, les méthodes fondées sur l'approche stochastique permettent

de générer un ensemble de solutions optimales, ce qui peut s'avérer pertinent lors de la résolution de problèmes d'optimisation multi-critère.

c. Définition de la méthode d'optimisation multi-objectifs (ou multi-critères)

Un problème (ou une méthode) d'optimisation multi-critère consiste à rechercher simultanément le minimum de plusieurs fonctions critères qui dépendent des mêmes variables (variables de décision). (75)

L'optimum recherché dépend de la résolution multi-critère employée :

- Pondérations des fonctions : l'optimum d'une fonction d'agrégation des fonctions critères est recherché. Ceci revient à résoudre un problème d'optimisation mono-critère.
- Approche Pareto : l'optimum est défini comme l'ensemble des solutions Pareto-optimales (identifiées dans l'espace de décision) qui réalisent l'ensemble des meilleurs compromis (identifiés dans l'espace des critères) entre les fonctions critères.

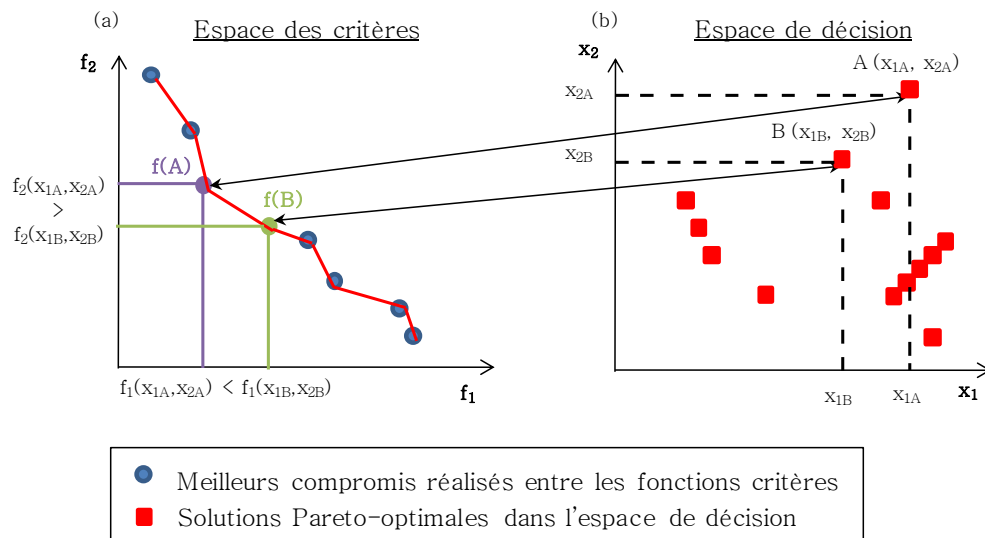


Figure 116 Approche Pareto (61)

Dans le cas de nos expériences, l'axe x_1 est la fréquence et l'axe x_2 le rapport cyclique. L'espace des critères correspond au pourcentage de détection par exemple pour fond sombre f_1 et fond blanc f_2 .

Le front de Pareto correspond à l'ensemble des meilleurs compromis possibles entre les fonctions critères dans l'espace des critères à autant de dimensions que de fonctions critères optimisées simultanément.

Pour identifier l'ensemble des meilleurs compromis, l'approche Pareto sera employée dans le cadre de nos expériences.

d. L'optimisation dans le cas de nos expériences

Cette section est organisée en suivant les différentes étapes de la méthode du Dr. Villa (2012) (75) (76)

Variables et échantillonnage

Afin de répondre aux problématiques expérimentales, nous avons initialement défini :

- Les variables de décision :
 - f : Fréquence (en Hz)
 - γ : Rapport cyclique (en %)
- L'échantillonnage qui correspond aux 24 scénarii présentés :
 - Fréquence : 50, 55, 60, 65, 70, 80, 90, 100 Hz (8 valeurs)
 - Rapport cyclique : 20, 50, 80 % (3 valeurs)

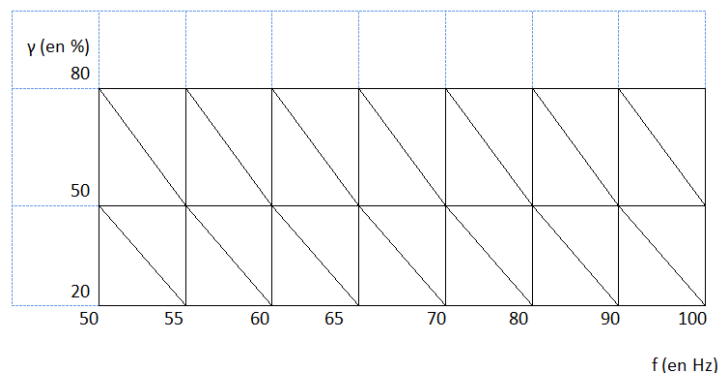


Figure 117 Echantillonnage et maillage de l'espace de décision employé pour l'interpolation linéaire

Fonctions critères

Dans le cas de la problématique 1, les fonctions sont définies à partir des résultats obtenus pour chaque fond coloré : sombre, blanc, rouge, vert, et bleu, soit 5 fonctions.

Dans le cas de la problématique 2, les fonctions sont définies à partir des résultats obtenus pour chaque axe de perception sur un fond donné (sombre ou blanc) : 0° , 45° et 90° , soit 3 fonctions.

Chaque fonction critère est estimée via une interpolation bilinéaire entre les données expérimentales connues (diagonale descendante comme illustrée sur la Figure 117). L'interpolation bilinéaire est réalisée à partir des 24 couples $[f, \gamma]$ pour lesquels $g(f, \gamma)$ est connu. Pour estimer la fonction g dans tout l'espace de décision $[f, \gamma]$, pour un couple quelconque (f_{Si}, γ_{Si}) , la valeur de $g(f_{Si}, \gamma_{Si})$ est déterminée en considérant le triangle dans lequel il se situe, défini par trois points échantillonnés connus.

En effet, dans une interpolation bilinéaire, la fonction est composée de triangles définis par trois points échantillonnés $P1(f1, \gamma1, g(f,\gamma1))$, $P2(f2, \gamma2, g(f2,\gamma2))$ et $P3(f3, \gamma3, g(f3,\gamma3))$. Chaque triangle appartient à un plan défini selon l'équation suivante :

$$aX + bY + cZ + d = 0$$

où a, b, c et d sont déterminés à partir des coordonnées connues des sommets du triangle $(f1, \gamma1, g(f1, \gamma1))$, $(f2, \gamma2, g(f2,\gamma2))$ et $(f3, \gamma3, g(f3,\gamma3))$.

La valeur de $g(f_{si}, \gamma_{si})$ d'une solution quelconque $Si(f_{si}, \gamma_{si})$ est définie par l'équation suivante :

$$g(f_{si}, \gamma_{si}) = \frac{-d - a \cdot f_{si} - b \cdot \gamma_{si}}{c}$$

où a, b, c et d sont les paramètres du plan correspondant au triangle auquel la solution appartient.

Méthode

Une méthode d'optimisation par approche stochastique a été utilisée pour obtenir l'ensemble des solutions optimales qui réalisent les meilleurs compromis possibles entre les fonctions critères, plus précisément via l'algorithme génétique NSGA-II.

Cet algorithme tire aléatoirement des solutions possibles dans l'espace de décision puis, selon leurs performances, elles seront retenues, mutées, croisées avec d'autres pour générer une population d'enfants et ainsi déterminer une nouvelle population de solutions potentielles à la génération suivante et ainsi de suite. A chaque nouvelle génération, les solutions sont meilleures qu'à la précédente. Nous obtenons ainsi une approximation de l'ensemble de solutions Pareto-optimales. (76)

Résultats

La méthode permet donc d'obtenir l'ensemble des solutions Pareto-optimales dans l'espace de décision à deux dimensions [Fréquence, Rapport cyclique] et l'ensemble des meilleurs compromis correspondants dans l'espace des critères.

5. Papillotement de la lumière et couleur de l'environnement : utilisation de la méthode d'optimisation

a. Problématique et méthode

Rappel de la Problématique 1:

Quels sont les couples $[f, \gamma]$ optimaux à considérer quelle que soit la couleur de l'environnement, pour que le papillotement de la lumière ne soit pas perçu consciemment ?

Méthode :

Afin de répondre à la problématique, nous allons nous intéresser à des pourcentages similaires de personnes qui ont perçu le papillotement de la lumière quelle que soit la couleur du fond. Nous avons choisi d'étudier plusieurs cas : 0% de perception consciente du papillotement de la lumière, 5%, 20% et 50%. Ceci consiste à identifier les couples $[f, \gamma]$ optimaux pour avoir des solutions Pareto-optimales dont les performances, quelle que soit la couleur du fond, s'approchent au mieux des pourcentages 0%, 5%, 20% ou 50%.

b. Définition des fonctions critères g pour chaque optimisation :

➤ Optimisation 1 : 5 fonds colorés, 0% de perception :

$g1(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre})$

$g2(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Blanc})$

$g3(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Rouge})$

$g4(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Vert})$

$g5(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Bleu})$

Ceci permettra d'obtenir les solutions optimales (chacunes définies par un couple $[f, \gamma]$) pour s'approcher au mieux de 0% de variations perçues quelle que soit la couleur du fond.

➤ Optimisation 2 : 5 fonds colorés, 5% de perception :

$g1(f, \gamma) = |5\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre})|$

$g2(f, \gamma) = |5\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Blanc})|$

$g3(f, \gamma) = |5\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Rouge})|$

$g4(f, \gamma) = |5\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Vert})|$

$g5(f, \gamma) = |5\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Bleu})|$

Ceci permettra d'obtenir les solutions optimales (chacunes définies par un couple $[f, \gamma]$) pour s'approcher au mieux de 5% de variations perçues quelle que soit la couleur du fond.

➤ Optimisation 3 : 5 fonds colorés, 20% de perception :

$$g1(f, \gamma) = |20\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre})|$$

$$g2(f, \gamma) = |20\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Blanc})|$$

$$g3(f, \gamma) = |20\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Rouge})|$$

$$g4(f, \gamma) = |20\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Vert})|$$

$$g5(f, \gamma) = |20\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Bleu})|$$

Ceci permettra d'obtenir les solutions optimales (chacunes définies par un couple $[f, \gamma]$) pour s'approcher au mieux de 20% de variations perçues quelle que soit la couleur du fond.

➤ Optimisation 4 : 5 fonds colorés, 50% de perception :

$$g1(f, \gamma) = |50\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre})|$$

$$g2(f, \gamma) = |50\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Blanc})|$$

$$g3(f, \gamma) = |50\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Rouge})|$$

$$g4(f, \gamma) = |50\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Vert})|$$

$$g5(f, \gamma) = |50\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Bleu})|$$

Ceci permettra d'obtenir les solutions optimales (chacunes définies par un couple $[f, \gamma]$) pour s'approcher au mieux de 50% de variations perçues quelle que soit la couleur du fond.

c. Représentation 3D des fonctions critères :

Nous pouvons également réaliser une représentation 3D des fonctions critères, dont les axes sont la fréquence (variable de décision 1), le rapport cyclique (variable de décision 2) et le pourcentage de perception du papillotement de la lumière (performance de la solution sur la fonction critère g).

- Par exemple, la Figure 118 présente la fonction critère $g1$ (0% de perception sur fond sombre) du problème d'optimisation 1 (qui recherche l'ensemble des solutions Pareto-optimales dont les performances se rapprochent au mieux de 0% de perception consciente du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur du fond) :

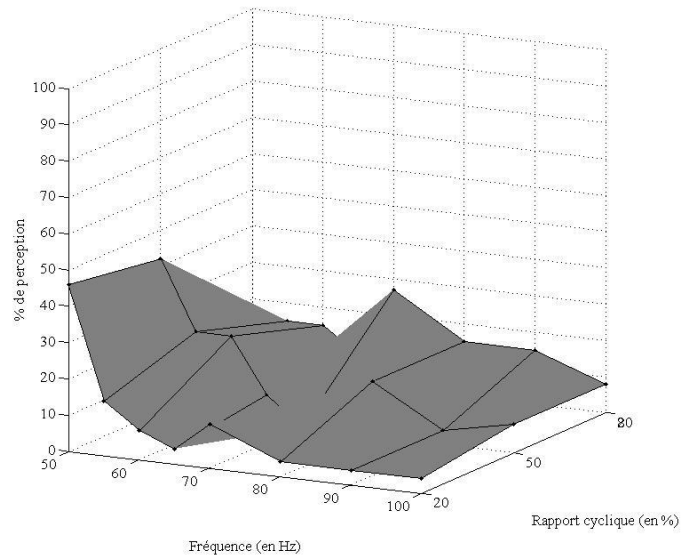


Figure 118 Représentation 3D de $g_1(f, \gamma) = \%$ variations perçues (f, γ , fond Sombre)

- De même, la Figure 119 présente la fonction critère g_2 (0% de perception sur fond blanc) intervenant dans le problème d'optimisation 1 (recherche des solutions Pareto-optimales dont les performances se rapprochent au mieux de 0% de perception consciente du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur du fond).

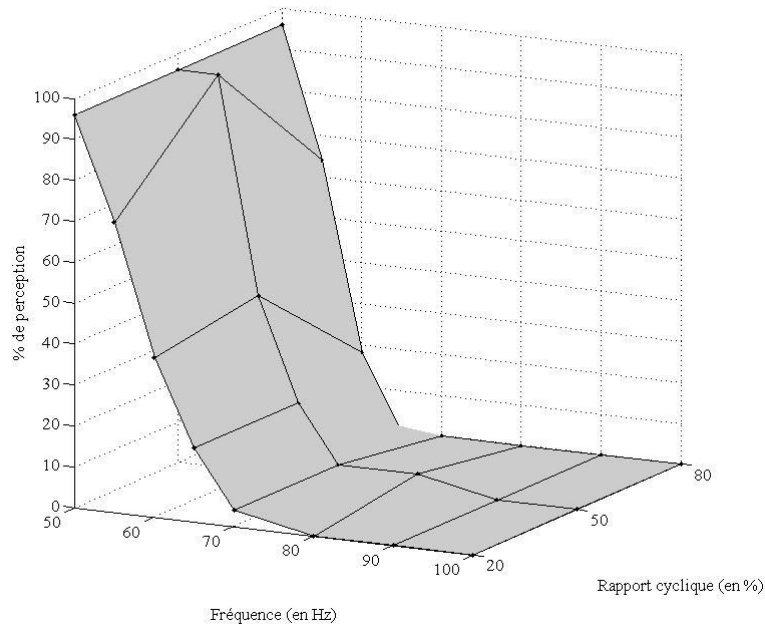


Figure 119 Représentation 3D de $g_2(f, \gamma) = \%$ variations perçues (f, γ , fond Blanc) – Les points représentent les pourcentages bruts perçus par expérience

d. Réalisation de l'optimisation

Nous utilisons l'algorithme génétique NSGA-II avec les réglages précisés dans le tableau suivant. Ils ont été choisis arbitrairement après une étude empirique de la convergence principalement selon le nombre de générations et la taille de la population. A chaque nouvelle génération, les solutions sont meilleures qu'à la précédente jusqu'à ce que l'algorithme ait convergé et alors la population n'évolue plus.

| Optimisation | Population* | Génération** | Taux de mutation | Taux de croisement |
|---|-------------|--------------|------------------|--------------------|
| Optimisation 1 : 5 fonds colorés, 0% de perception | 100 | 100 | 0.5 | 0.9 |
| Optimisation 2 : 5 fonds colorés, 5% de perception | 100 | 100 | 0.5 | 0.9 |
| Optimisation 3 : 5 fonds colorés, 20% de perception | 100 | 100 | 0.5 | 0.9 |
| Optimisation 4 : 5 fonds colorés, 50% de perception | 100 | 100 | 0.5 | 0.9 |

Figure 120 Réglages de l'algorithme génétique

***Population :** nombre de solutions par génération, et donc nombre de solutions optimales identifiées.

****Génération :** critère d'arrêt de l'algorithme d'optimisation, après n générations. Ce sont les solutions identifiées à ce moment là qui correspondent aux solutions optimales retenues.

Taux de croisement : l'algorithme génétique copie les mécanismes de la sélection naturelle pour garder les meilleures solutions et converger vers les solutions optimales. Pour trouver de nouvelles solutions qui pourraient être meilleures, il croise les chromosomes de deux solutions bonnes pour obtenir un enfant : concrètement S1(50Hz,20%), S2(70Hz,90%) => Enfant1(50Hz,90%) et Enfant2(70Hz,20%). Le taux de croisement est donc le nombre de croisements réalisés (en %) pour générer des enfants dans la génération suivante.

Le **taux de mutation** est le nombre de mutations réalisées (en %) pour générer des enfants dans la génération suivante. Par exemple, S1(50Hz, 20%) génère un Enfant1 (50Hz, 60%). Une des deux variables de décision de l'enfant garde la valeur du parent.

e. Résultats de l'optimisation

Suite aux calculs, nous obtenons les informations comme présentées dans le tableau ci-après :

| | Coordonnées des solutions Pareto-optimales dans l'espace de décision | | Coordonnées des meilleurs compromis dans l'espace des critères, chacun réalisé par une solution optimale correspondante = performances de la solution selon chaque critère (plus la performance est proche de 0, meilleure la solution est sur le critère) | | |
|---|--|------------------|--|-----------|-----------|
| | Fréquence | Rapport cyclique | Critère 1 | Critère 2 | Critère 3 |
| Solution optimale 1 + Compromis associé | | | | | |
| Solution optimale 2 | | | | | |
| Solution optimale 3 | | | | | |
| ... | | | | | |

Figure 121 Exemple du tableau type pour recueillir les informations après calcul d'optimisation.

Ces informations nous permettent d'obtenir le graphe de solutions suivant :

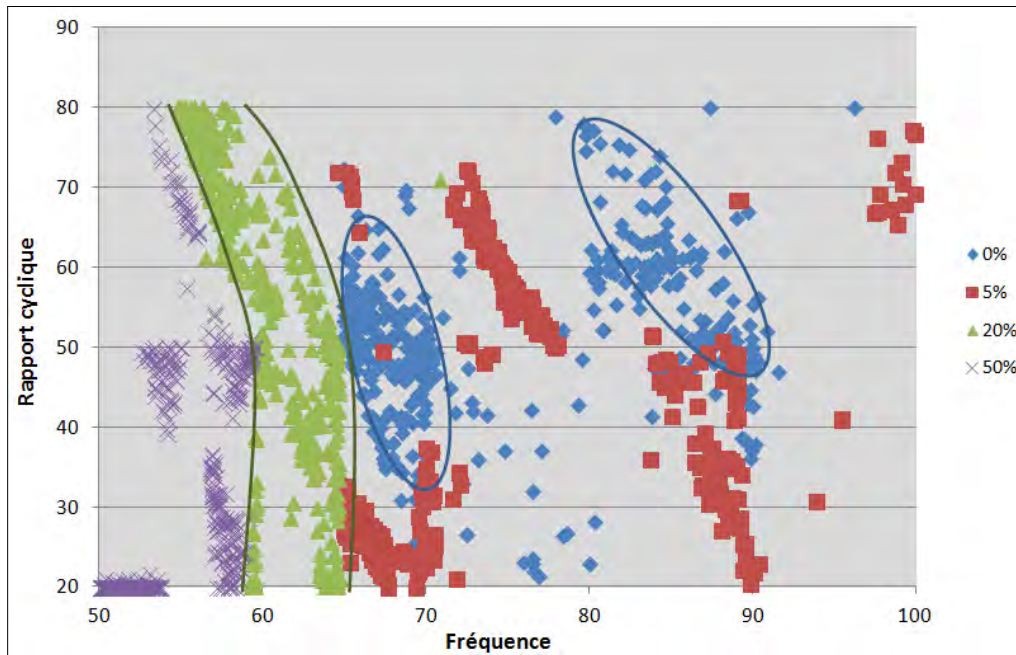


Figure 122 Solutions Pareto optimales de perception du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de l'environnement

f. Analyse des résultats

Le graphique obtenu présente les solutions Pareto-optimales $[f, \gamma]$ qui permettent d'assurer au mieux :

- les 0% de perception consciente du papillotement de la lumière (losanges bleus)
- les 5 % de perception consciente du papillotement de la lumière (carrés rouges)
- les 20% de perception consciente du papillotement de la lumière (triangles verts)
- les 50% de perception consciente du papillotement de la lumière (croix violettes)

Voici deux exemples afin de mieux comprendre ce que représentent concrètement ces solutions optimales :

- Lorsque nous consultons le tableau de valeurs pour 0% de perception consciente du papillotement de la lumière, (losanges bleus sur le graphe) nous obtenons pour le couple : $[70,0601\text{Hz} ; 49,8409 \text{ \%}]$:

| Fréquence | Duty Cycle | Ecart SOMBRE | Ecart BLANC | Ecart ROUGE | Ecart VERT | Ecart BLEU |
|-----------|------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------|
| 70,0601 | 49,8409 | 0,0317 | 3,9788 | 0,048 | 0,0212 | 7,976 |

Figure 123 Valeurs obtenues pour le couple $[70,0601\text{Hz} ; 49,8409 \text{ \%}]$ pour 0% de perception

Il faut bien comprendre que, par la méthode d'optimisation, nous cherchons à minimiser simultanément le pourcentage de détection pour chaque couleur, et que les fonctions critères correspondent au pourcentage de détection pour chaque couleur.

Ceci signifie que, dans ce cas, nous avons pour les fonds sombre, rouge et vert presque 0% de perception du papillotement de la lumière, mais par contre, pour le fond blanc nous avons environ 3%, et pour le bleu environ 7%. Ce compromis peut être retenu entre toutes les fonctions « couleur de fond », et favorise les fonds sombre, rouge et vert.

- Lorsque nous consultons le tableau de valeurs pour 50% de perception consciente du papillotement de la lumière, (croix violettes sur le graphe) nous obtenons pour le couple : $[57,5533 \text{ Hz} ; 20\%]$:

| Fréquence | Duty Cycle | Ecart SOMBRE | Ecart BLANC | Ecart ROUGE | Ecart VERT | Ecart BLEU |
|-----------|------------|--------------|-------------|-------------|------------|------------|
| 57,5533 | 20 | 38,3226 | 5,8112 | 4,9126 | 0,6819 | 2,5989 |

Figure 124 Valeurs obtenues pour le couple $[57,5533 \text{ Hz} ; 20\%]$ pour 50% de perception

Dans le cas des 50% de perception consciente du papillotement de la lumière, rappelons que les fonctions sont définies par : $g(f, \gamma) = |50\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{couleur de fond})|$. Ainsi, les valeurs du tableau sont des écarts absolus entre le pourcentage de perception étudié (50%) et le pourcentage réel de perception du papillotement de la lumière issu des expériences. Cet écart peut être positif ou négatif, mais notre fonction est telle qu'elle affichera le module de la valeur. Plus l'écart est proche de 0, et plus nous nous rapprochons de 50% de perception du papillotement de la lumière. En quelque sorte, cet écart correspond à « l'erreur de jugement » par rapport au pourcentage étudié.

Ainsi, dans notre exemple, la solution Pareto-optimale retenue permet d'être proche de 50% de perception sur fond vert (écart proche de 0%), les autres couleurs de fond révèlent des écarts faibles, sauf sur le fond sombre où la valeur est bien plus élevée (environ 38%). Malgré cette disparité d'écarts, il s'agit d'un des meilleurs compromis de solutions.

g. Paramètres physiques de confort visuel

Comme nous venons de l'expliquer, certains écarts de fonctions critères sont beaucoup trop élevés.

Or, si nous nous intéressons à l'humain, percevoir dans l'un des cas le papillotement de la lumière s'apparente à un inconfort visuel. Aussi, nous devons être plus restrictifs sur les solutions Pareto-optimales à retenir pour aboutir à des paramètres physiques de confort visuel quelque soit le fond coloré.

Afin de minimiser la perception visuelle du papillotement de la lumière, nous avons choisi de travailler sur une double exigence, en suivant successivement deux méthodes d'aide à la décision à posteriori (i.e : des méthodes qui permettent de sélectionner, de retenir une ou quelques solutions optimales parmi l'ensemble généré à l'issue de l'optimisation, et à posteriori car appliquée après la phase d'optimisation):

- Exigence sur les écarts des fonctions critères (i.e. contrainte sur les performances) :
 - Déterminer l'écart maximal d'une solution Pareto-optimale,
 - Classer par ordre croissant les écarts maximaux de toutes les solutions Pareto-optimales,
 - Appliquer une tolérance de 50% sur le plus petit des écarts maximaux : nous appliquons donc un premier filtre sur les solutions Pareto-optimales.

A l'issue de ce filtre, une forte sélection sur les solutions Pareto-optimales a été effectuée et permet d'éviter les solutions Pareto-optimales qui présentent des performances extrêmes. Il s'agit de notre premier sous ensemble de solutions Pareto-optimales.

- Exigence sur les écarts moyens à appliquer au premier sous-ensemble de solutions Pareto-optimales : affinage du 1^{er} sous-ensemble de solutions Pareto-optimales.
 - Nous définissons une fonction agrégée : elle définit un écart moyen (ou barycentre) étant donné que nous affectons un poids similaire à chaque fonction critère :
 $a.g1(fsi,\gamma si) + b.g2(fsi,\gamma si) + c.g3(fsi,\gamma si) = 1$ avec $a = b = c = \text{constantes}$,
 - Classer par ordre croissant les écarts moyens. Ceci permet d'identifier l'écart moyen qui a la performance agrégée la plus faible,
 - Nous choisissons de retenir les solutions pour lesquelles l'écart moyen appartient à l'intervalle [Ecart moyen min ; 5/3 Ecart moyen min].

Ceci constitue un second filtre d'affinage des solutions Pareto-optimales et permet de conserver un intervalle d'écart moyen constant quelque soit le pourcentage de détection du papillotement de la lumière étudié. Nous obtenons ainsi un second sous-ensemble de solutions Pareto-optimales.

A l'issue de cette méthode nous avons donc filtré les meilleurs couples de solutions Pareto-optimales en relation avec le confort visuel du papillotement de la lumière. Voici le graphique obtenu :

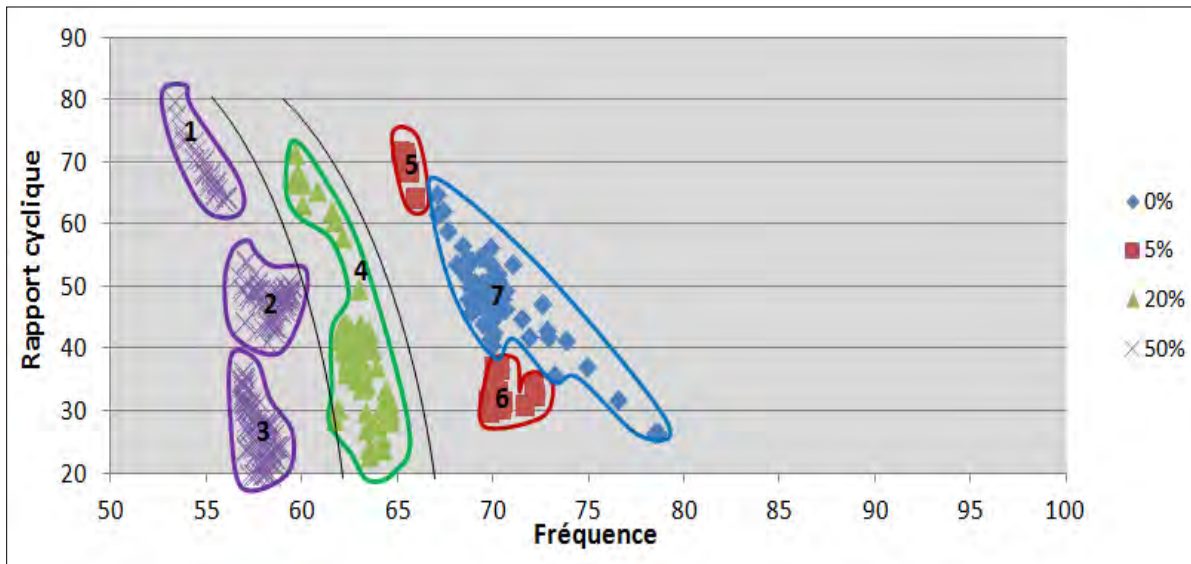


Figure 125 Solutions Pareto-optimales filtrées

Ce graphique présente les zones des meilleures solutions Pareto-optimales quelle que soit la couleur de l'environnement d'un point de vue du confort visuel, et présente des solutions filtrées par rapport au graphique initial de solutions Pareto-optimales quelle que soit la couleur de l'environnement.

Plus en détail :

- Les solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux des 50% de perception consciente du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de fond sont représentées en mauve sur le graphique. Les résultats sont cohérents avec les espérances, puisque sont localisés pour de faibles fréquences. Trois zones de solutions optimales se détachent : 1, 2 et 3. Dans la norme EN 12464-1, le contraste de luminance spatial est fonction de l'âge et est défini confortable pour 50% de perception. Aussi, par transposition, nous avons souhaité observer les solutions s'approchant au mieux des 50% de perception visuelle du contraste temporel de luminance (le papillotement de la lumière). Mais, contrairement au contraste de luminance spatial, avoir 50% ou plus de détection des contrastes de luminance temporel n'est pas du tout confortable d'un point de vue visuel. Nous considérons donc que ces zones de solutions (1,2 et 3) sont des solutions Pareto-optimales très inconfortables.
- Le papillotement de la lumière étant désagréable à percevoir, nous avons choisi d'affiner notre étude en considérant les solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux de 20% de perception consciente du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de fond

(triangles verts sur la graphique, zone 4). Effectivement, ce cas s'avère très intéressant car il définit une plage de couples $[f, \gamma]$ caractéristique des résultats obtenus pour les FFC de chaque couleur de fond. Cette zone est relativement bien dessinée et constitue la zone FFC limite entre perception consciente et inconsciente du papillotement de la lumière. Les solutions $[f, \gamma]$ appartenant à cette zone sont des solutions Pareto-optimales inconfortables, et ne seront pas conseillées pour des applications où les actions des humains sont nécessaires.

- Les solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux des 5% de perception consciente du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de l'environnement, sont représentées par des carrés rouges sur le graphique. Elles définissent deux zones 5 et 6. Ces solutions peuvent provenir des réponses issues d'un doute sur la détection consciente du papillotement de la lumière par les observateurs.
Sachant, de part nos expériences dans le domaine, que plus les fréquences et rapports cycliques augmentent et moins le papillotement de la lumière sera perçu consciemment, nous pouvons considérer que ces zones de solutions sont Pareto-optimales confortables.
- Les solutions Pareto-optimale s'approchant au mieux de 0% de perception consciente du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de l'environnement, sont représentées par des losanges bleus sur le graphique et laissent apparaître la zone 7. Les couples $[f, \gamma]$ appartenant à cette zone caractérisent une non-perception consciente du papillotement de la lumière ce qui est très agréable d'un point de vue visuel. Ils constituent les meilleurs paramètres physiques en termes de confort. Aussi, ces couples $[f, \gamma]$ définissent des solutions Pareto-optimales très confortables.

De part nos connaissances sur le domaine, nous pouvons représenter un graphique général de confort visuel du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de l'environnement et mettre en avant les solutions Pareto-optimales que nous venons de définir :

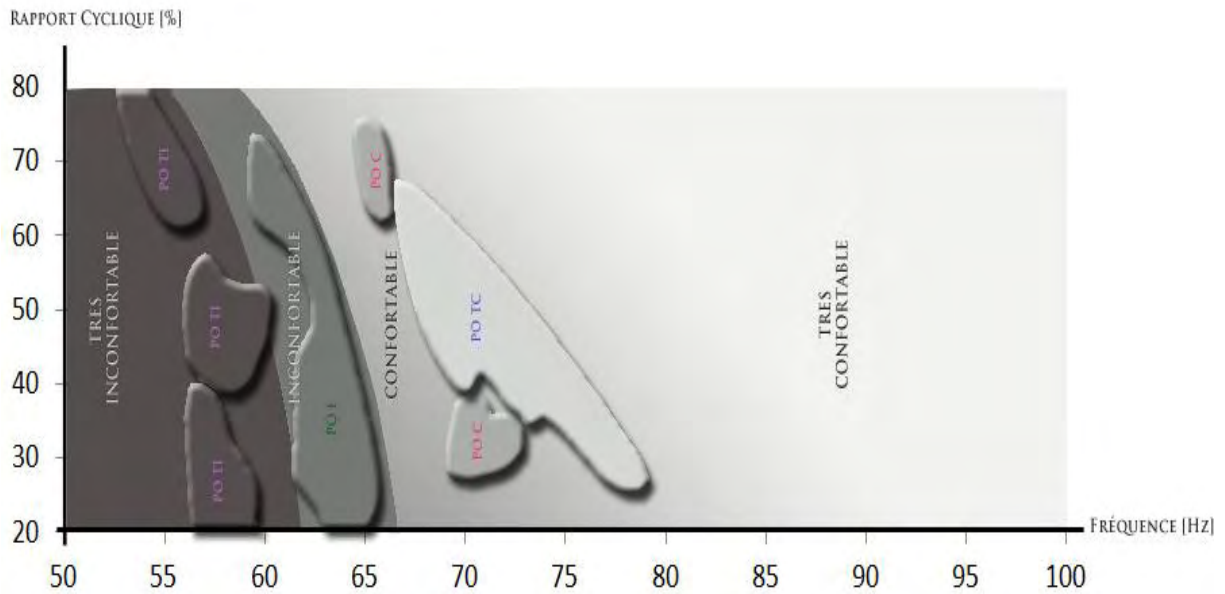


Figure 126 Confort visuel du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de l'environnement et solutions Pareto-optimales de confort - PO TI= couple de solutions Pareto-Optimales Très Inconfortable - PO I= couple de solutions Pareto-Optimales Inconfortable - PO C= couple de solutions Pareto-Optimales Confortable - PO TC = couple de solutions Pareto-Optimales Très Confortable

6. Papillotement de la lumière et axes de perception visuelle : utilisation de la méthode d'optimisation

a. Problématique et méthode

Rappel problématique 2 :

Quels sont les couples [Fréquence; Rapport cyclique] optimaux quel que soit l'axe de perception du fond, pour que le papillotement de la lumière ne soit pas perçu consciemment ? Nous nous intéresserons aux résultats obtenus pour le fond sombre, puis ceux du fond blanc, et enfin nous couplerons les résultats du fond sombre et blanc.

Méthode:

Afin de résoudre la problématique, il nous faut identifier des solutions pour lesquelles il y a 0% de détection du papillotement de la lumière quel que soit l'angle d'observation (0°, 45° ou 90°). Nous ferons de même pour 5%, 20% et 50% de détection, et ceci pour les deux fonds sombre et blanc.

Ainsi, pour chaque cas de pourcentage de perception, le problème d'optimisation comporte trois fonctions $g(f, \gamma)$, qui vont donner pour chaque couple de fréquence f et rapport cyclique γ :

- l'écart absolu entre le pourcentage d'observation étudié et le pourcentage de variations perçues consciemment sous un angle de vue de 0°
- l'écart absolu entre le pourcentage d'observation étudié et le pourcentage de variations perçues consciemment sous un angle de vue de 45°
- l'écart absolu entre le pourcentage d'observation étudié et le pourcentage de variations perçues consciemment sous un angle de vue de 90°

b. Définition des fonctions critères g pour chaque optimisation :

Voici les fonctions définies pour les différentes optimisations, par exemple pour le fond sombre. Les fonctions sont définies de la même manière pour le fond blanc.

- Optimisation 1 : 0% de perception :

$g1(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 0^\circ)$

$g2(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 45^\circ)$

$g3(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 90^\circ)$

Ceci permettra d'obtenir les solutions optimales (définies par un couple $[f, \gamma]$) pour s'approcher au mieux de 0% de variations perçues quel que soit l'angle d'observation sur fond sombre.

➤ Optimisation 2 : 5% de perception :

$$g1(f, \gamma) = |5\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 0^\circ)|$$

$$g2(f, \gamma) = |5\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 45^\circ)|$$

$$g3(f, \gamma) = |5\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 90^\circ)|$$

Ceci permettra d'obtenir les solutions optimales (définies par un couple $[f, \gamma]$) pour s'approcher au mieux de 5% de variations perçues quel que soit l'angle d'observation sur fond sombre.

➤ Optimisation 3 : 20% de perception :

$$g1(f, \gamma) = |20\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 0^\circ)|$$

$$g2(f, \gamma) = |20\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 45^\circ)|$$

$$g3(f, \gamma) = |20\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 90^\circ)|$$

Ceci permettra d'obtenir les solutions optimales (définies par un couple $[f, \gamma]$) pour s'approcher au mieux de 20% de variations perçues quel que soit l'angle d'observation sur fond sombre.

➤ Optimisation 4 : 50% de perception :

$$g1(f, \gamma) = |50\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 0^\circ)|$$

$$g2(f, \gamma) = |50\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 45^\circ)|$$

$$g3(f, \gamma) = |50\% - \% \text{ variations perçues}(f, \gamma, \text{fond Sombre}, 90^\circ)|$$

Ceci permettra d'obtenir les solutions optimales (définies par un couple $[f, \gamma]$) pour s'approcher au mieux de 50% de variations perçues quel que soit l'angle d'observation sur fond sombre.

a. Réalisation de l'optimisation

Comme précédemment, nous utilisons l'algorithme génétique NSGA-II avec les réglages précisés dans le tableau suivant. 400 solutions sont testées par génération, et 50 générations ont été testées.

| Optimisation | Population | Génération | Taux de mutation | Taux de croisement |
|------------------------|------------|------------|------------------|--------------------|
| Vision Fond sombre 0% | 400 | 50 | 0.5 | 0.9 |
| Vision Fond sombre 5% | 400 | 50 | 0.5 | 0.9 |
| Vision Fond sombre 20% | 400 | 50 | 0.5 | 0.9 |
| Vision Fond sombre 50% | 400 | 50 | 0.5 | 0.9 |

Figure 127 Réglages de l'algorithme génétique

c. Résultat de l'optimisation pour le fond sombre

La méthode permet d'obtenir les solutions $[f, \gamma]$ Pareto-optimales de perception visuelle du papillotement de la lumière quel que soit l'axe de perception pour le fond sombre, et sont présentées sur le graphique ci-dessous :

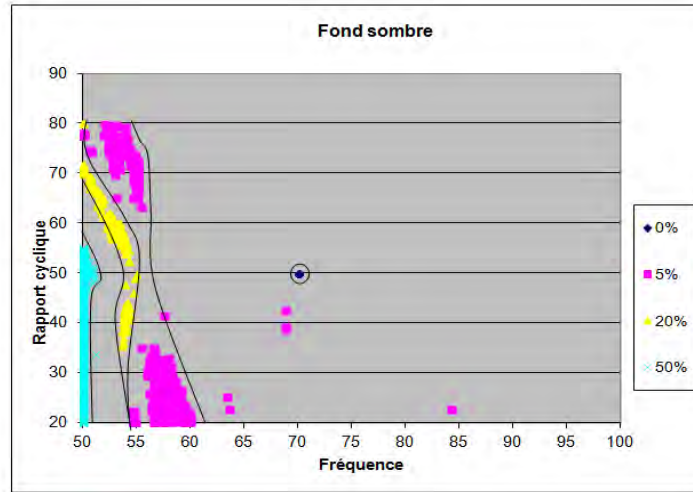


Figure 128 Optimisation présentant le pourcentage de perception du papillotement de la lumière sur fond sombre (0%, 5%, 20%, 50%) pour différents angles de perception

d. Résultat de l'optimisation pour le fond blanc

La méthode permet d'obtenir les solutions $[f, \gamma]$ Pareto-optimales de perception visuelle du papillotement de la lumière quel que soit l'axe de perception pour le fond blanc et sont présentées par le graphique ci-dessous :

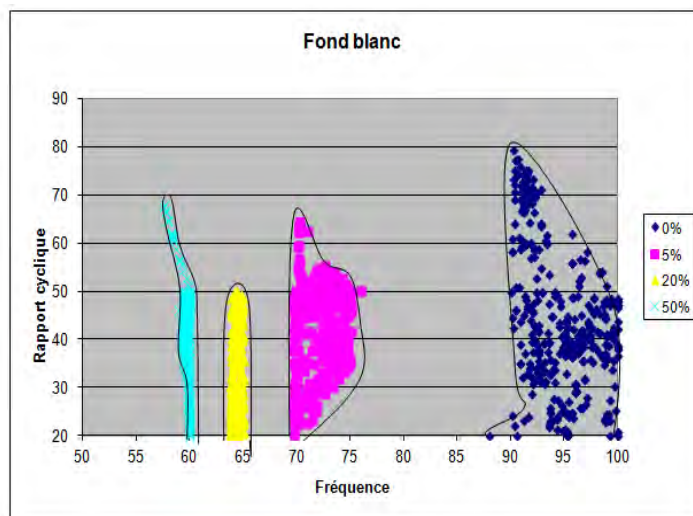


Figure 129 Optimisation présentant le pourcentage de perception du papillotement de la lumière sur fond blanc (0%, 5%, 20%, 50%) pour différents angles de perception

e. Analyse et interprétation

Les solutions Pareto-optimales obtenues pour le fond sombre et le fond blanc quelle que soit l'orientation de perception visuelle, ont des apparences différentes :

- Pour le fond sombre, les zones de solutions Pareto-optimales sont étroites, et resserrées entre 50 et 60 Hz, avec juste une unique solution optimale à 0% de perception consciente du papillotement de la lumière [70Hz, 50%].
- En revanche, pour le fond blanc, les solutions sont plus étendues en fréquence, et les zones de solutions Pareto-optimales sont très ordonnées et distinctes. Nous remarquons aussi des limites nettes des rapports cycliques. De plus, la zone des solutions Pareto-optimales se rapprochant au plus de 20% de perception visuelle consciente quelle que soit l'orientation de la perception (carrés jaunes sur le graphe), ne décrit plus la courbe caractéristique de FFC.
- Il apparait de façon nette que la perception du contraste de luminance temporel sur fond blanc est plus évidente à détecter pour un observateur que sur fond sombre.

Il est toutefois difficile d'effectuer une réelle comparaison entre les résultats sur fond sombre et sur fond blanc, aussi, une optimisation sur l'ensemble des solutions Pareto-optimales quel que soit l'axe de perception visuelle du papillotement de la lumière couplé fond sombre et fond blanc permettra de révéler les compromis de solutions $[f, \gamma]$ Pareto-optimaux intéressants pour l'utilisation du papillotement de la lumière pour des activités humaines.

f. Résultats couplés fonds sombre et blanc

Ainsi, après utilisation de la méthode d'optimisation multi-critère pour identifier des solutions Pareto-optimales quelle que soit l'orientation de la vision et la couleur du fond (sombre ou blanc), nous obtenons le graphique suivant :

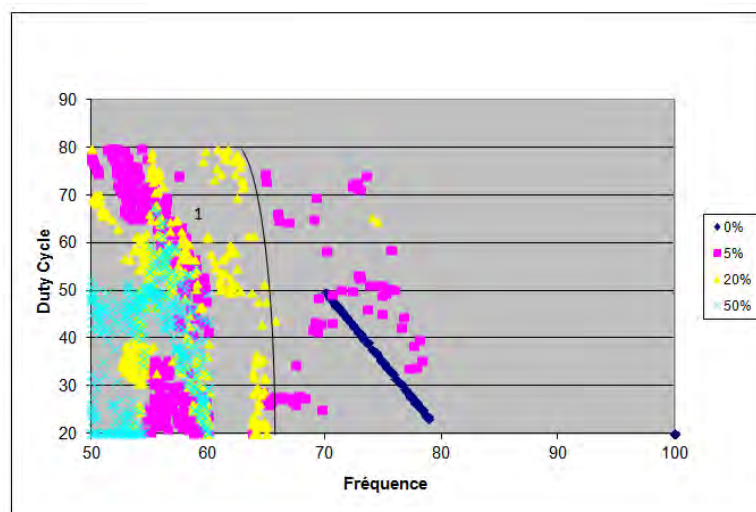


Figure 130 Solutions Pareto-optimales quel que soit l'axe de perception visuelle et la couleur de l'environnement (fond sombre et blanc)

g. Analyse et interprétation

Nous constatons qu'un segment de solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux des 0% de perception visuelle consciente du papillotement de la lumière apparait (losanges bleus). La pente montre que plus la fréquence augmente et plus le rapport cyclique peut avoir une valeur faible (pente = -2,8). En d'autres termes, lorsque la fréquence augmente, la perception visuelle est moins influencée par le contraste de luminance. Mais ceci ne constitue pas une généralité puisque les différentes solutions favorisent certaines fonctions critères.

Les solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux des 50% de perception consciente du papillotement de la lumière (croix bleues) sont toujours localisées pour des fréquences inférieures ou égales à 60 Hz.

Pour les solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux des 20% de perception consciente du papillotement de la lumière (triangles jaunes), les valeurs sont dans une zone comprise entre 50 et 65 Hz (zone 1 sur le graphe) et sont limitées par une courbe rappelant une limite FFC.

Les solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux des 5% de perception consciente du papillotement de la lumière (carrés roses), définissent deux zones : une parmi la zone 1 se limitant à 60Hz et l'autre au-delà de la courbe FFC limite.

Il semble que certains points se superposent. Comment est-il possible de trouver dans une même zone de l'espace de décision des solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux des 5 % de perception consciente du papillotement de la lumière indépendamment de l'axe de vision et du fond (sombre ou blanc) avec des solutions Pareto-optimales à 50 % ?

Ceci nécessite de regarder plus en détail le tableau de valeurs issu de la méthode. Prenons l'exemple d'une solution présentant environ 60Hz et 43% de rapport cyclique identifiée comme Pareto-optimales à l'issue de l'optimisation 5% de perception, et une solution définie par environ 60Hz et 43% issue de l'optimisation 50% de perception.

- pour 5% de perception nous avons: (Solution [59,6365 ; 43,2291])

| | Fond sombre Axe 0° | Fond blanc Axe 0° | Fond sombre Axe 45° | Fond blanc Axe 45° | Fond sombre Axe 90° | Fond blanc Axe 90° |
|--|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Ecart absolu | 14,6 | 40,9 | 4,2 | 40,16 | 7,98 | 45,75 |
| Ecart réel | 14,6 | 40,9 | -4,2 | 40,16 | 7,98 | 45,75 |
| Performance (5%perception + valeur réelle) | 19,6 | 45,9 | 0,8 | 45,16 | 12,98 | 50,75 |

Figure 131 Ecart et performance de perception du papillotement de lumière pour le couple [59,6365 ; 43,2291] pour 5% de perception

➤ pour 50% de perception nous avons: (Solution [59,8774 ; 43,4021])

| | Fond sombre Axe 0° | Fond blanc Axe 0° | Fond sombre Axe 45° | Fond blanc Axe 45° | Fond sombre Axe 90° | Fond blanc Axe 90° |
|---|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Ecart absolu | 30,29 | 6,58 | 49,75 | 6,8 | 37,55 | 0,24 |
| Ecart réel | -30,29 | -6,58 | -49,75 | -6,8 | -37,55 | 0,24 |
| Performance (50%perception + valeur réelle) | 19,71 | 43,42 | 0,25 | 43,2 | 12,45 | 49,76 |

Figure 132 Ecarts et performance de perception du papillotement de lumière pour le couple [59,8774 ; 43,4021] pour 50% de perception

Les solutions ne sont pas les mêmes, mais sont, en performance, du même ordre de grandeur.

Pour se rapprocher au mieux des 5% de perception, si nous arrondissons les performances, nous obtenons (20%,46%,1%,45%,13%,51%), et cette solution favorise les 0°, 45° et 90° pour le fond sombre. Ceci est cohérent si nous regardons les résultats expérimentaux où nous constatons que sur fond blanc, il n'y a presque aucun cas à 5% de perception du papillotement de la lumière, contrairement au fond sombre où les contrastes de luminances temporels induits sont plus faibles, et les réponses plus mitigées.

Quand nous résonnons sur l'obtention de 50% de perception, la performance est proche du cas précédent (20%, 43%, 0%, 43%, 12%, 50%), mais ici, la solution favorise les 0°, 45° et 90° pour le fond blanc. Ceci est également cohérent avec les résultats expérimentaux qui montrent que sur fond sombre, il est rare d'avoir 50% de perception du papillotement de la lumière contrairement au fond blanc qui induit des contrastes de luminances temporels plus forts, et des réponses plus sûres des observateurs.

h. Paramètres physiques de confort visuel

Les couples de solutions sont un compromis ce qui signifie que toutes les fonctions critères ne peuvent pas être satisfaites simultanément, et privilégient certaines fonctions critères (notion de performance).

Nous nous rendons également compte ici, par exemple, que certaines solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux de 5% de perception consciente du papillotement de la lumière, indépendamment de l'axe de perception et du fond (sombre ou blanc) apparaissent entre 55 et 60Hz. Ces solutions ne sont pas en réel accord avec les connaissances du domaine du papillotement de la lumière et ne pourront pas être retenues dans le cas du confort visuel. Nous devons donc être plus restrictifs sur les solutions Pareto-Optimales à retenir pour aboutir à des paramètres physiques de confort visuel quel que soit l'axe d'orientation visuelle et le fond (sombre ou blanc).

Dans le but de déterminer les meilleures solutions Pareto-optimales, nous allons utiliser les mêmes méthodes de sélection que pour le cas du confort visuel du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de l'environnement. Via le filtrage de solutions sur les écarts des fonctions critères et la conservation des plus petits écarts moyens, nous aboutissons à des couples de solutions Pareto-optimales de confort visuel du papillotement de la lumière.

Voici le graphique obtenu :

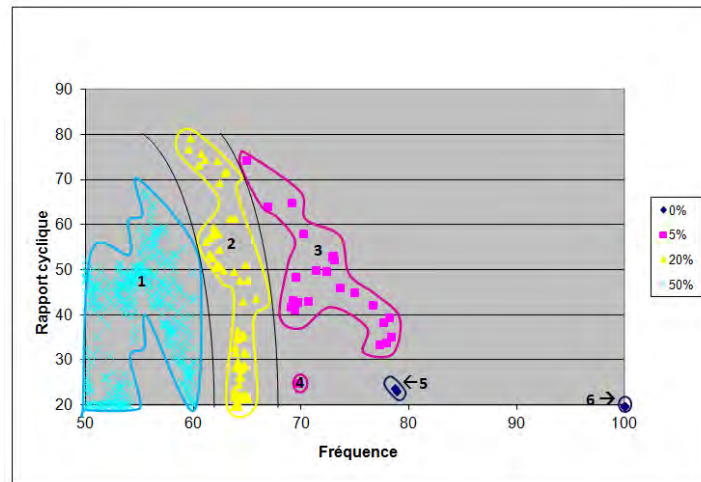


Figure 133 Solutions Pareto- optimales filtrées quel que soit l'axe d'orientation et la couleur de fond (sombre ou blanc)

Ce graphique présente des zones de solutions Pareto-optimales quel que soit l'axe d'orientation visuelle et la couleur de fond (sombre et blanc) d'un point de vue du confort visuel, et présente des solutions filtrées par rapport au graphe initial de solutions Pareto-optimales quel que soit l'axe d'orientation visuelle et la couleur de fond (sombre et blanc).

Plus en détail :

- Les solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux des 50% de perception consciente du papillotement de la lumière quel que soit l'axe de perception visuel et la couleur de fond (sombre ou blanc) sont représentées en bleu ciel sur le graphique. Les résultats sont cohérents avec les espérances, puisqu'ils sont localisés pour de faibles fréquences. Une grande zone de solutions optimales se dessine (zone1). Cette zone contient des solutions Pareto-optimales très inconfortables.
- Les solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux de 20% de perception consciente du papillotement de la lumière quel que soit l'axe de perception et la couleur (sombre et blanc) sont représentées en jaune (zone2). Ici aussi, les couples $[f, \gamma]$ de cette zone constituent la zone FFC limite entre perception consciente et inconsciente du papillotement de la lumière. Les solutions $[f, \gamma]$ appartenant à cette zone sont des solutions Pareto-optimales inconfortables, et ne seront pas conseillées pour des applications où les actions des humains sont nécessaires.

- Les solutions Pareto-optimales s'approchant au mieux des 5% de perception consciente du papillotement de la lumière quel que soit l'axe d'orientation visuelle et la couleur de fond (sombre et blanc) sont représentées par des carrés roses sur le graphique, et définissent deux zones : une grande zone (zone 3), et un couple un peu plus éloigné, zone 4. Ces solutions peuvent provenir des réponses issues d'un doute sur la détection consciente du papillotement de la lumière par les observateurs. Sachant, de part nos expériences dans le domaine, que plus les fréquences et rapports cycliques augmentent et moins le papillotement de la lumière sera perçu consciemment, nous pouvons considérer que ces zones de solutions sont Pareto-optimales confortables.
- Les solutions Pareto optimales s'approchant au mieux de 0% de perception consciente du papillotement de la lumière quel que soit l'axe d'orientation visuelle et la couleur de fond (sombre et blanc), sont représentées par des losanges bleus marine. Les solutions sont peu nombreuses : zone 5 et 6. Les couples $[f, \gamma]$ appartenant à ces zones caractérisent une non perception consciente du papillotement de la lumière ce qui est très agréable d'un point de vue visuel. Ils constituent les meilleurs paramètres physiques en termes de confort. Ces couples de solutions sont donc très intéressants pour des applications où les actions des humains sont nécessaires. Aussi, ces couples $[f, \gamma]$ définissent des solutions Pareto-optimales très confortables.

De part nos connaissances sur le domaine, nous pouvons représenter un graphe général de confort visuel du papillotement de la lumière quel que soit l'axe d'orientation visuelle et la couleur de l'environnement (sombre et blanc) et mettre en avant les solutions Pareto-optimales que nous venons de définir

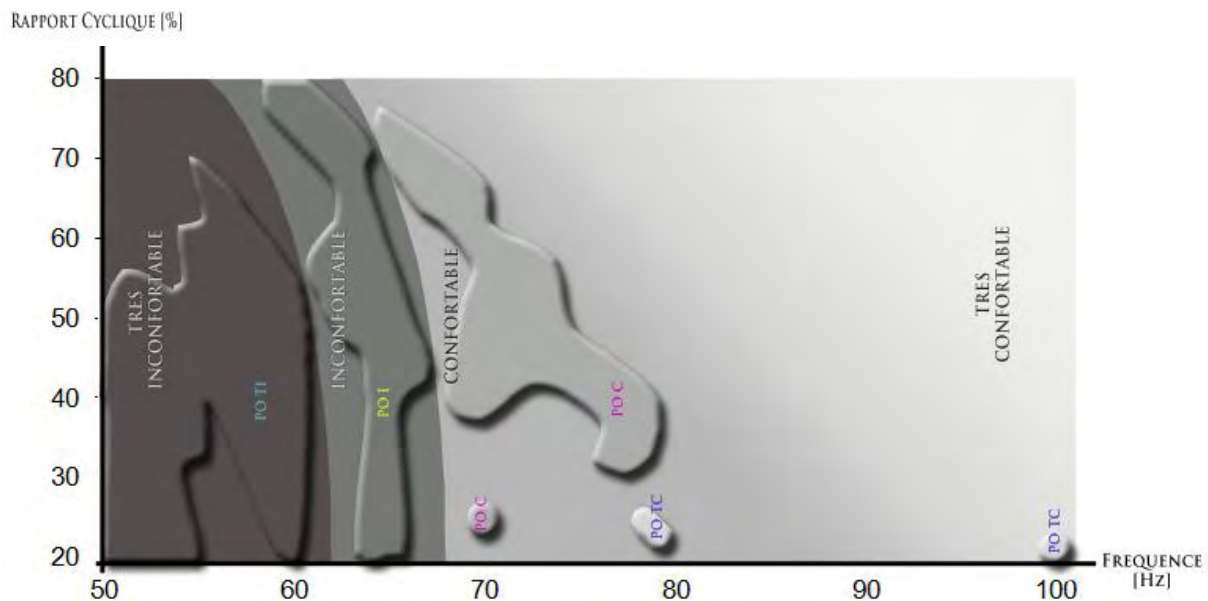


Figure 134 Confort visuel du papillotement de la lumière quel que soit l'axe de perception visuelle et la couleur de l'environnement (fond sombre et fond blanc) et solutions Pareto-optimales de confort - PO TI= couple de solutions Pareto-Optimales Très Inconfortable - PO I= couple de solutions Pareto-Optimales Inconfortable - PO C= couple de solutions Pareto-Optimales Confortable - PO TC = couple de solutions Pareto-Optimales Très Confortable

7. Brillance ressentie et économies d'énergie

a. Définition de la brillance

La brillance est un terme qui a vu sa définition évoluer au cours du temps. Initialement, la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a voulu exprimer le fait que deux teintes, à pureté et luminance identiques peuvent nous paraître visuellement plus brillantes l'une de l'autre. Aussi ce terme était spécifique à la colorimétrie. Cependant, face à la difficulté de mettre en équation ce ressenti qui dépend des caractéristiques neuro-psycho-physiologiques de chaque individu, la CIE a préféré utiliser un terme quantifiable par mesure électronique : la luminance. Notons également, que dans le langage courant, la brillance est synonyme d'éclat par opposition au terme « mâte » (77).

Il convient donc de bien distinguer le terme brillance (luminance) et la brillance ressentie qui est subjective (neuro-psycho-physiologie).

L'effet Broca Sulzer, dont nous avons déjà parlé (chapitre 3, II.4.c) est l'un des phénomènes qui va principalement nous intéresser puisqu'il traite de la brillance ressentie. Par ajustement de brillance ressentie, les paramètres physiques de puissance pourraient être revus à la baisse, ce qui laisserait envisager des économies d'énergie.

Cependant, le conditionnel est de mise puisque selon les cas expérimentaux, des résultats contradictoires ont été obtenus concernant les ressentis de brillance (abordé chapitre III, II-5).

Aussi, qu'en est-il dans le cas de nos expériences rapportées à une fréquence de papillotement de la lumière courante sur le secteur (100Hz) ?

b. Nos expériences de brillance ressentie en lumière indirecte

Problématiques :

Lors de mesures de papillotement de la lumière émis par des sources communes dans notre laboratoire (38) nous avons constaté que globalement les LEDs vibrent à 100Hz, avec un taux de modulation à 90%. Ainsi, comment les observateurs perçoivent-ils cette lumière, présentée de façon indirecte ? L'effet Broca Sulzer se vérifie-t-il dans le cas d'une lumière indirecte ? (78)

Les expériences :

Nous utilisons cette fois ci les deux compartiments de notre dispositif expérimental pour effectuer des comparaisons de perception visuelle.

1^{ère} expérience :

Un côté est alimenté en continu à 100Hz, l'autre en pulsé, toujours à 100Hz, et avec un rapport cyclique à 50% et un taux de modulation fixe de 100%, en prenant soin que la puissance moyenne (2W) et les éclairagements moyens induits soient similaires de part et d'autre (environ 170 lux sur la surface observée.)

Les observateurs (8 au total) s'installent de façon équidistante des deux compartiments, à une distance d'un mètre du bord de la boîte expérimentale, et doivent répondre à la question suivante via boutons poussoirs : « quel est le côté le plus brillant ? » et si la lumière vibre d'un côté, préciser lequel.

L'expérience a été menée sur fonds sombre et sur fond blanc.

2^{nde} expérience :

Cette fois, l'objectif est de comparer la brillance ressentie entre fond sombre et fond blanc, les deux côtés étant alimentés en mode pulsé : 100Hz, 50% de rapport cyclique.

Les résultats en pourcentage :

➤ 1^{ère} expérience:

| Fond blanc | | Fond sombre | |
|-------------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------|
| Quel est le côté le plus brillant ? | La lumière vibre t-elle ? | Quel est le côté le plus brillant ? | La lumière vibre t-elle ? |
| 100% mode pulsé | <ul style="list-style-type: none">93,75 % non6, 35% oui côté lumière pulsée | 100% mode pulsé | 100% non |

Figure 135 Résultats principaux 1^{ère} expérience

➤ 2^{nde} expérience

| | |
|---|---|
| Fond blanc vs Fond sombre en mode pulsé : Quel est le côté le plus brillant ? | Percevez-vous une vibration ? et sur quel fond ? |
| 100% le fond blanc | <ul style="list-style-type: none">75% non25% oui côté sombre |

Figure 136 Résultats principaux 2^{nde} expérience

Interprétation:

1^{ère} expérience : Globalement, nous constatons que, quel que soit le fond, la brillance ressentie, à presque l'unanimité, est plus forte côté pulsé que côté continu. L'effet Broca Sulzer est donc vérifié pour un stimulus indirect à champ large.

2^{nde} expérience : Tous les observateurs ont convenu que le fond blanc donne une impression de brillance plus élevée et ont noté, pour deux d'entre eux, une fluctuation avec le fond sombre.

Il y a deux points importants révélés par ces expériences :

- Le premier est que le fonctionnement pulsé de la LED peut effectivement nous amener à des économies d'énergie si les gens les perçoivent comme plus brillante pour la même puissance d'entrée.
- Le deuxième point, est que, même si dans notre expérience, le papillotement de la lumière paraît plus facile à déceler sur le fond blanc, à 100 Hz, la comparaison ne le révèle pas puisque cette tendance semble inhibée pour 75% et inversée pour 25%.

Cependant, ces études sont basées sur un petit nombre d'observateurs, aussi ces résultats donnent une tendance, mais doivent être pris avec précaution.

Notons toutefois que nos résultats sont en accord avec les expériences empiriques réalisées par flashes de lumière directe et que nous nous situons dans le cas du point A reporté sur la courbe empirique ci-dessous.

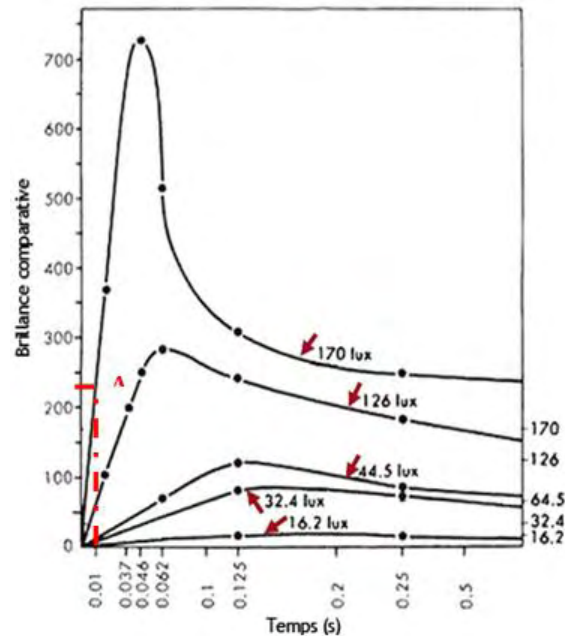


Figure 137 Brillance ressentie du flash de notre expérience reporté sur le graphique empirique présentant la brillance apparente (ou ressentie) de flashes avec des luminances variables et fonction de la durée du flash. Effet Broca et Sulzer (60)

c. Expérience sur la comparaison de niveaux d'éclairément

Problématique

Nous connaissons le diagramme de Kruithoff qui donne une indication sur les préférences lumineuses des observateurs en considérant les deux paramètres : éclairément et température de couleur (**Annexe 12**). Mais, les observateurs sont-ils capables de déterminer si deux ambiances lumineuses ont la même brillance selon leur niveau d'éclairément ?

L'expérience :

L'expérience consiste en la comparaison de brillance ressentie. Pour cela, nous utilisons notre dispositif expérimental, éclairé par des LEDs similaires de part et d'autre. Le côté droit présente une valeur d'éclairément fixe à comparer avec des valeurs variables du côté gauche. (Il n'y a pas de papillotement de la lumière dans ces expériences).

Deux niveaux d'éclairéments sont soumis à l'étude 120 lux et 500 lux. Ces valeurs ne sont pas choisies au hasard puisqu'elles correspondent aux niveaux d'éclairéments recommandés en éclairage intérieur par la norme EN 12464-1, 120 lux au niveau du sol pour une zone de type circulation et 500lux au niveau d'un plan de travail pour une zone de type bureau.

Les observateurs doivent répondre sur la brillance ressentie pour différents niveaux d'éclairément. (Forcément une variation d'éclairément impliquera une variation de luminance.) Chaque expérience est menée sur une dizaine d'observateurs ayant une vision emmétrope. Ici aussi, l'observateur est installé à une distance de 1m du bord de la boîte et équidistant des compartiments à comparer. La vision est binoculaire et nous sommes en niveau photopique. La question posée est la suivante : quel est le côté le plus brillant (gauche / droite) ou ont-ils la même brillance ?

L'expérience a été menée sur fonds sombre, blanc et colorés (rouge, vert, bleu). Ainsi nous aurons plusieurs indications, tout d'abord sur la brillance ressentie, et ensuite, sur les écarts d'éclairéments perceptibles (qui finalement caractérisent une incertitude sur les réponses).

Une expérience complémentaire nous a également permis d'aborder la notion de température de couleur sur le jugement de la brillance ressentie.

Les résultats :

➤ **Fond sombre**

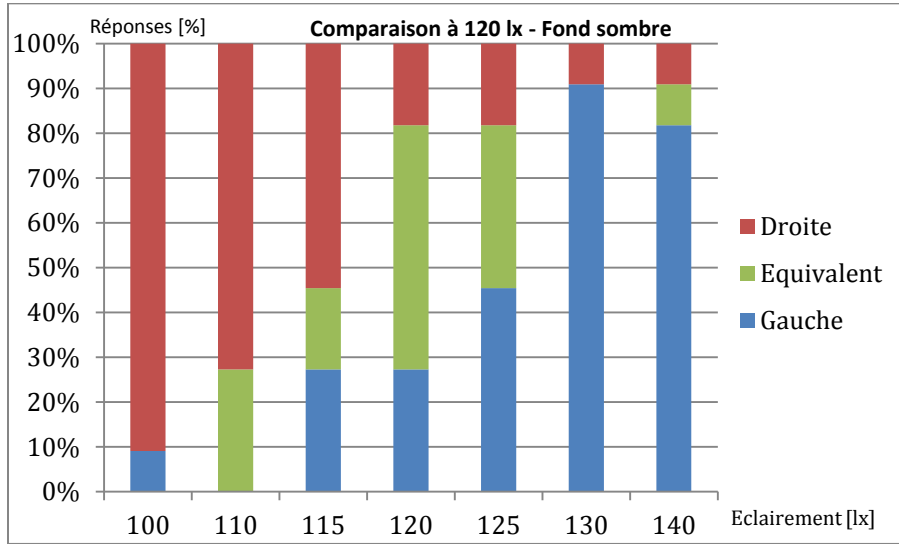


Figure 138 Résultats Fond sombre – Comparaison à 120 lx

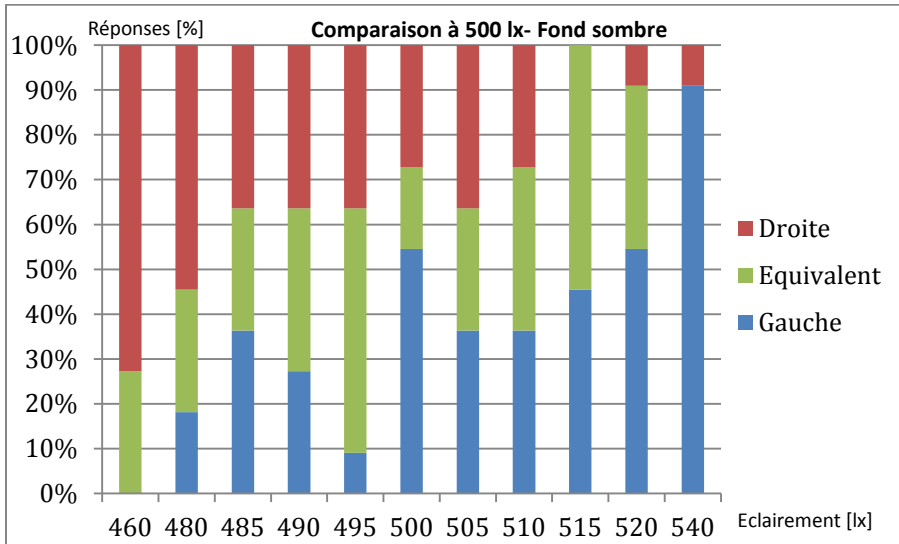


Figure 139 Résultats Fond sombre – Comparaison à 500 lx

➤ **Fond blanc**

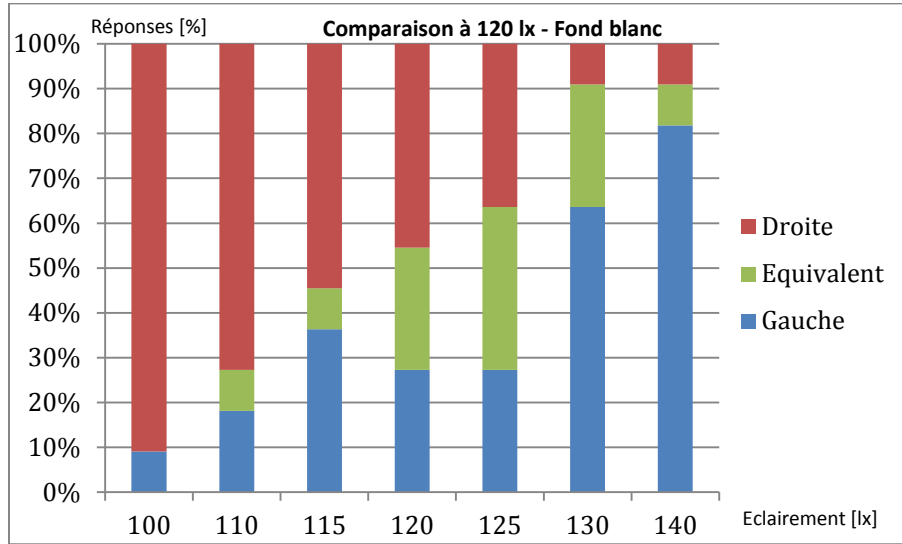


Figure 140 Résultats Fond blanc – Comparaison à 120 lx

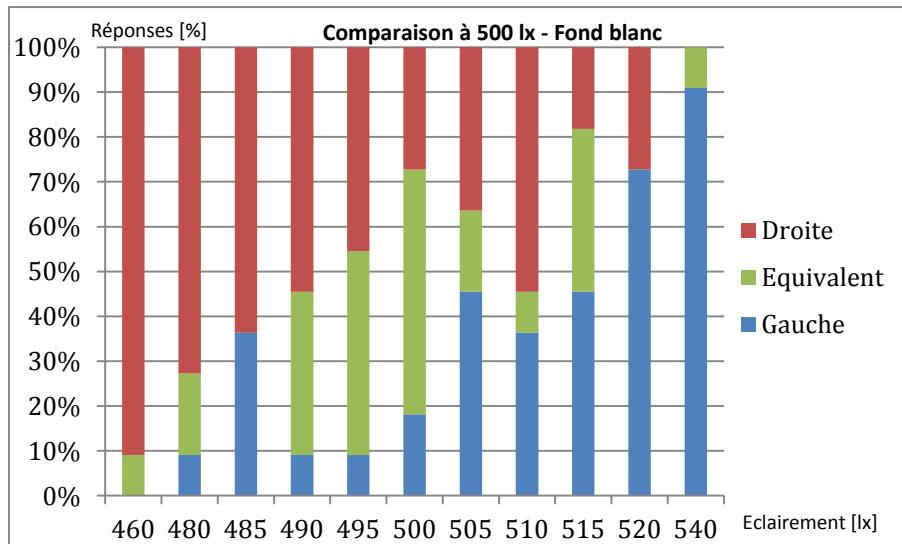


Figure 141 Résultats Fond blanc – Comparaison à 500 lx

➤ **Fond rouge**

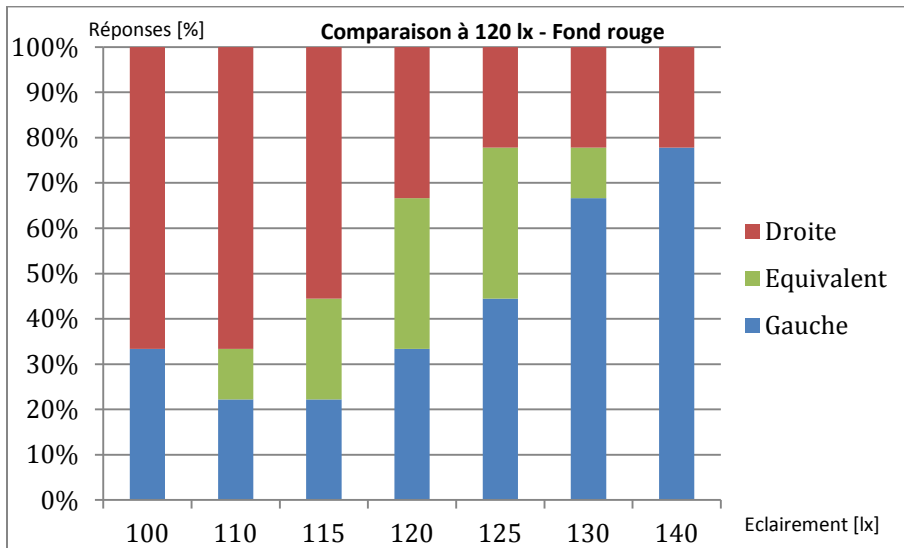


Figure 142 Résultats Fond rouge – Comparaison à 120 lx

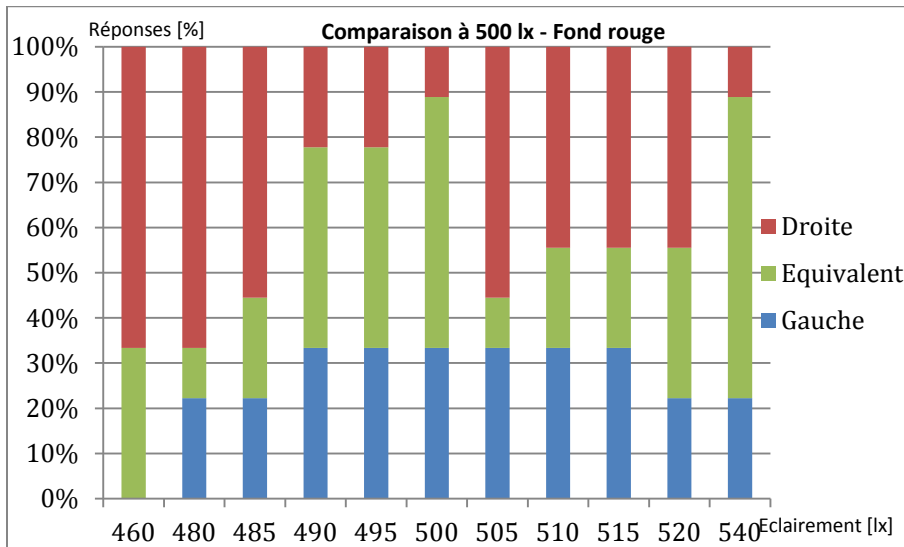


Figure 143 Résultats Fond rouge – Comparaison à 500 lx

➤ **Fond vert**

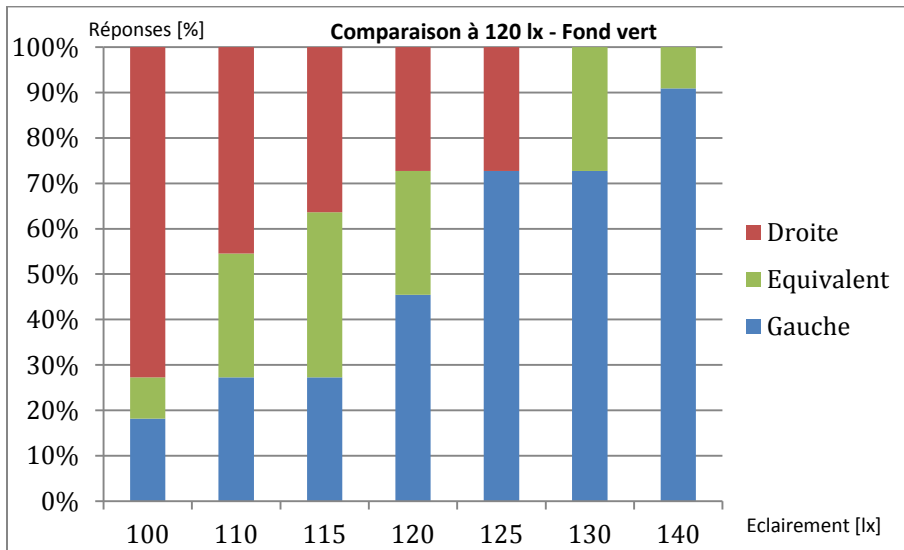


Figure 144 Résultats Fond vert – Comparaison à 120 lx

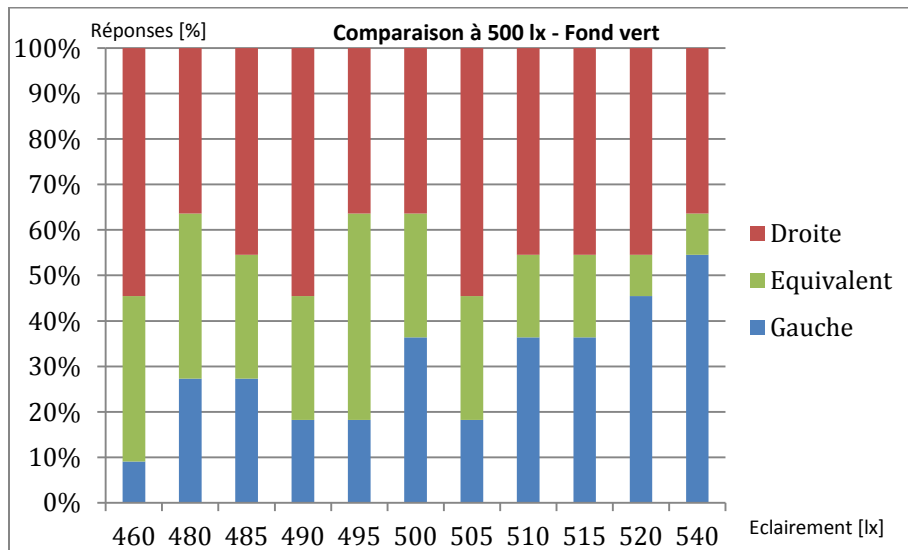


Figure 145 Résultats Fond vert – Comparaison à 500 lx

➤ **Fond bleu**

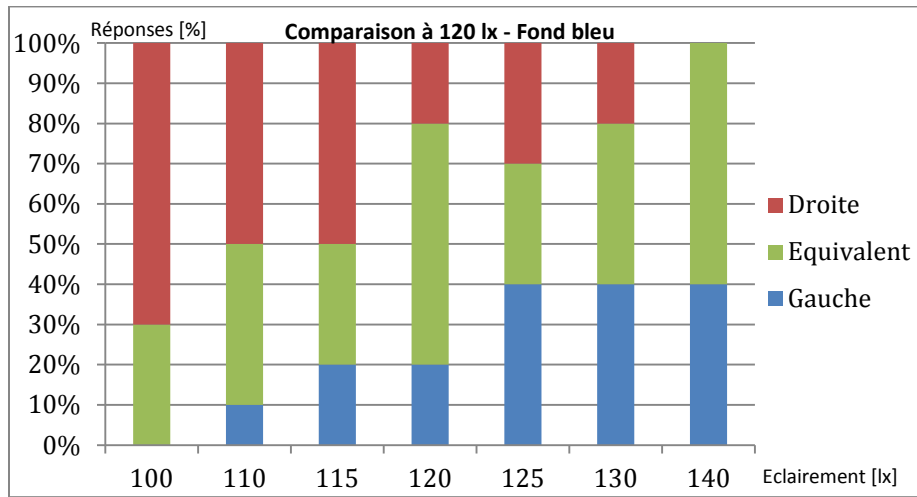


Figure 146 Résultats Fond bleu – Comparaison à 120 lx

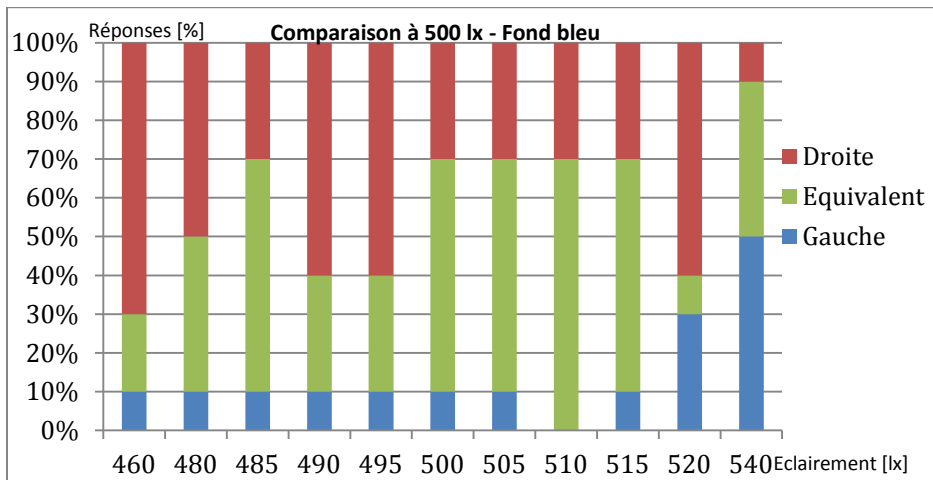


Figure 147 Résultats Fond bleu – Comparaison à 500 lx

Analyse et interprétation :

En théorie, les graphiques obtenus devraient être de la forme suivante :

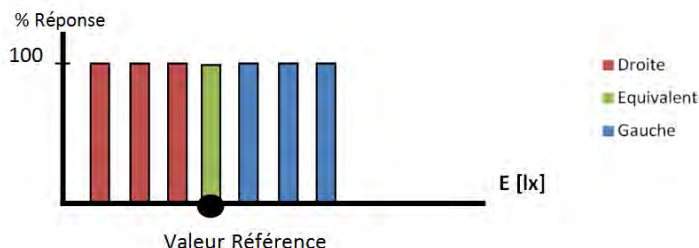


Figure 148 Graphique théorique des réponses suite aux comparaisons de niveaux d'éclairément

En effet, le côté droit étant fixe (valeur référence), si la valeur côté gauche est plus petite que la référence, alors le côté droit devrait être perçu comme plus lumineux, et inversement. Mais c'est sans compter sur les « erreurs de perception » (par rapport à la réalité des paramètres physiques) et les jugements des observateurs, que nous allons essayer de quantifier.

Dans la réalité, nous constatons que, quel que soit le niveau d'éclairément de référence, les observateurs ont du mal à déterminer quel est le côté le plus lumineux, et donc le plus éclairé.

Les « erreurs » sur les réponses se visualisent rapidement sur les graphiques et sont représentées par :

- des réponses bleues et vertes pour des éclairéments inférieurs à la valeur de référence ;
- des réponses bleues et rouges pour la valeur de référence ;
- des réponses rouges et vertes pour les éclairéments supérieurs à la référence.

Nous pouvons ainsi déterminer le tableau suivant présentant les « erreurs de jugement » des observateurs en considérant les intervalles des éclairéments présentés autour de la valeur de référence :

| Couleur de fond | Référence à 120 lux Intervalle -20 lx / +20lx | Référence à 500 lux Intervalle -20 lx / +20l x | Référence à 500 lux Intervalle -40 lx / +40l x |
|--|--|---|---|
| | « Erreur de jugement » % | « Erreur de jugement » % | « Erreur de jugement » % |
| Sombre | 30,14 | 56,62 | 49,36 |
| Blanc | 36,14 | 45,56 | 38,91 |
| Rouge | 41 | 61,66 | 60,45 |
| Vert | 40 | 62,78 | 59,64 |
| Bleu | 50 | 65,56 | 60,91 |
| Erreur moyenne pour toutes les couleurs ϵ | $\epsilon_1=39,46$ | $\epsilon_2=58,44$ | $\epsilon_3=53,85$ |
| Variation de l'erreur | | $\epsilon_2 - \epsilon_1 = 18,98$ | $\epsilon_3 - \epsilon_2 = -4,59$ |

Figure 149 Erreurs de jugement selon les niveaux d'éclairément de référence et leurs intervalles de variation

Ce tableau s'avère plus explicite pour comprendre les tendances. Rappelons toutefois que le nombre d'observateurs étant faible, les résultats doivent être pris avec précaution.

Si nous comparons les résultats obtenus selon la couleur de fond :

- Les « erreurs de jugement » sont vraiment très élevées, et peuvent, dans l'expérience à 500 lux de référence, avoisiner les 60% ;
- Nous constatons que les « erreurs de jugement » pour chaque couleur, pour des intervalles de $-20\text{lx}/+20\text{lx}$, sont d'autant plus faibles que le niveau d'éclairage de référence est faible. A 500lx, un écart de 20 lx représente une variation d'éclairage de 4%. A 120 lx, un écart de 20lx représente, par contre, un plus fort pourcentage d'écart de 16,67% ;
- Par contre, il ne semble pas y avoir de logique concernant les pourcentages « d'erreurs de jugement » si nous les comparons aux luminances et sensibilité des photorécepteurs.

De manière générale, nous observons sur les graphiques que :

- la comparaison visuelle de niveaux d'éclairage n'est pas évidente, et que les « erreurs de jugement » dépendent du niveau d'éclairage de référence. L'œil humain a donc des difficultés à discerner de petites variations d'éclairage ce qui se traduit, lors de l'observation, par la difficulté visuelle à distinguer des contrastes de luminance spatiaux induits par les deux côtés à comparer ;
Remarque : nous n'abordons pas ici le contraste spatial chromatique, puisque les deux côtés du dispositif expérimental sont, pour chaque expérience, de la même couleur.
- Pour un même intervalle d'éclairage, la comparaison s'avère plus difficile à effectuer lorsque le niveau d'éclairage de référence est plus élevé. Une étude comparative sur le même pourcentage de variation par rapport aux valeurs de référence (120lx et 500lx) serait intéressante à mener ;
- A un même niveau d'éclairage, plus les intervalles de comparaison sont grands et moins il y aura « d'erreur de jugement », ce qui est logique puisque des écarts d'éclairage plus grands vont induire des contrastes de luminance spatiaux plus forts. Cependant, la diminution d'erreur n'est pas exceptionnelle. En effet, l'étude à 500 lux de référence montre que la variation de l'erreur n'est que de -4,59% lorsque nous passons d'un intervalle de $-20\text{lx}/20\text{lx}$ à $-40\text{lx}/40\text{lx}$.

La part neuro-psycho-physiologique n'est également pas à négliger puisqu'elle va également intervenir dans le jugement final.

Les « erreurs de jugement » sont donc affectées à une mauvaise perception et interprétation du contraste de luminance spatial pour lequel un côté semblera plus lumineux que l'autre. Il y a donc en quelque sorte un effet de brillance ressentie :

- La brillance ressentie apparaît dans les pourcentages « d'erreurs de jugement » ;
- Elle est d'autant plus forte que l'erreur est élevée ;
- Elle est plus forte pour de plus forts niveaux d'éclairement ;
- Elle est variable selon les couleurs comme le montrent les graphiques.

Cependant, la question « pourquoi existe-t-il cet effet de brillance ? » reste ouverte car rien ne semble réellement pouvoir l'expliquer.

Température de couleur et brillance ressentie

Dans cette expérience, une des LEDs de comparaison a été changée, de sorte que les températures de couleur soient différentes entre les deux compartiments, et que les deux LEDs fournissent le même niveau d'éclairement.

Il s'est avéré que, globalement, les observateurs ont indiqué qu'ils jugeaient plus brillant le fond qui leur paraît le moins jaune, parce qu'il leur semble ainsi mieux éclairé. Ceci s'étant surtout révélé pour le fond blanc.

d. Paramètres ayant un impact sur le ressenti de la brillance

La brillance ressentie est liée à des paramètres physiques mais également associée à un phénomène psycho-cognitif, lié à l'interprétation visuelle d'un signal lumineux. La physiologie de l'œil est également à considérer, puisque la sensibilité de l'œil sera affectée que nous soyons en conditions photopique, scotopique et mésopique.

Certains chercheurs tentent de mettre en équation la notion de brillance perçue pour un signal sinusoïdal de lumière. Rappelons qu'ils en ont déduit que la modélisation peut se faire par un filtre temporel général, auquel doivent se combiner des éléments non linéaires complexes à définir.

Dans notre cas, le signal est carré, ce qui devrait affecter les travaux précédents. Nous ne sommes pas en mesure de quantifier et de déterminer l'équation de brillance ressentie, mais, de part les expériences que nous avons menées au laboratoire LAPLACE, nous pouvons tout de même identifier les paramètres pouvant jouer un rôle sur la brillance réelle et ressentie, en définissant des fonctions de variables.

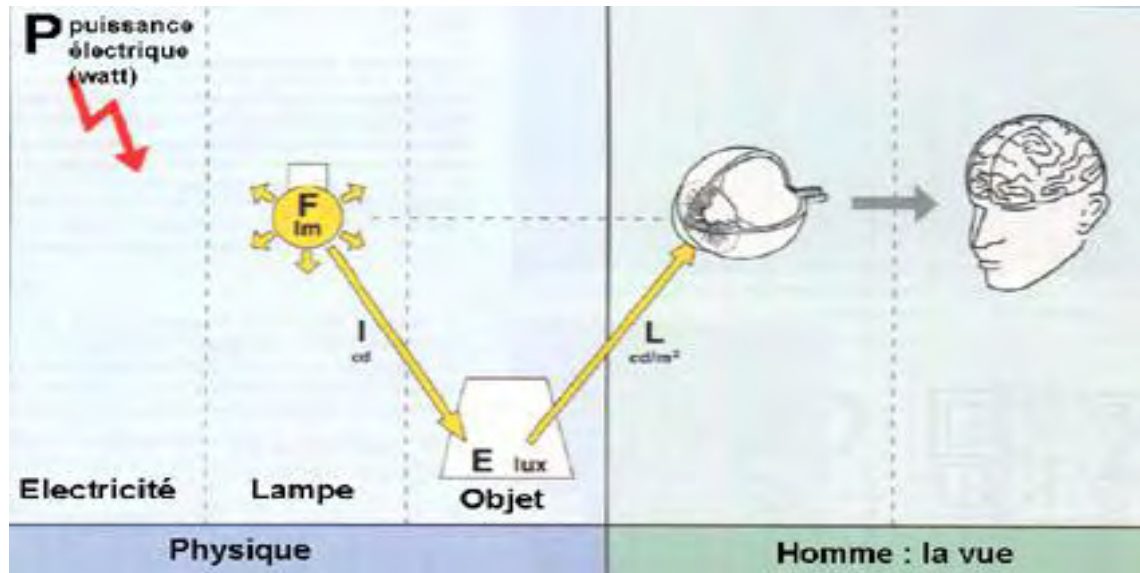


Figure 150 Illustration des grandeurs en éclairage (63)

D'un point de vue purement physique :

Brillance réelle= luminance = f (intensité, surface apparente)
dont la valeur est indépendante de la distance d'observation.

Dans le cas de **nos expériences** de lumière vibrante, une variation de luminance peut s'effectuer en modifiant :

- Le niveau d'éclairément moyen sur la surface observée E_{moy} :
 $E_{\text{moy}} = f(\text{flux}, \text{puissance}, \text{distance « source - surface éclairée »})$
- les paramètres du papillotement de la lumière :
 $\text{flickering} = f(\text{fréquence}, \text{rapport cyclique})$
- le fond :
 $\text{coefficient de réflexion de la surface } \rho = f(\text{matériau}) = f(\text{couleur}, \text{texture})$
- la position source-observateur :
 $\text{position « source-observateur »} = f(\text{orientation de la vision})$
- la taille du stimulus
 $\text{Taille du stimulus} = f(\text{surface apparente})$

Ainsi, dans le cadre de nos expériences, la brillance réelle est fonction de paramètres physiques :

Brillance réelle = luminance = f(Emoy, fréquence, rapport cyclique, ρ , position « source-observateur », taille du stimulus)

D'après les résultats expérimentaux et les données empiriques, nous pouvons mettre en évidence les paramètres qui impactent sur la perception visuelle, son traitement cognitif et émotionnel.

Les paramètres physiques déclencheurs sont ceux de la brillance réelle auxquels s'ajoute la température de couleur. Aussi, tous ces critères sont à considérer comme éléments de la fonction « brillance ressentie » :

Brillance ressentie = f (Brillance réelle, neuro-psycho-physiologie (Emoy, fréquence, rapport cyclique, ρ , position « source-observateur », taille du stimulus, température de couleur))

Cette définition de brillance ressentie en est à ce jour définie ainsi, mais nos futures investigations nous permettront d'approfondir et compléter les paramètres entrant en jeu, et de les quantifier.

III. ETUDE D'UNE APPLICATION DU PAPILOTTEMENT DE LA LUMIÈRE : ECLAIRAGE DE MUSEE

1. Problématique et paramètres initiaux

a. Problématique

Dans cette expérience, nous allons étudier l'éclairage des musées en utilisant une source pulsée, donc en créant du papillotement de lumière.

L'étude est comparative et traite de l'impact colorimétrique d'un éclairage à LEDs pulsées comparé à l'éclairage à LEDs en fonctionnement continu classique, ainsi que de l'aspect énergétique. Nous nous intéresserons également aux informations sur la façon dont les LEDs vieillissent sous les différents modes de fonctionnement.

b. Paramètres initiaux

Afin de réaliser cette expérience comparative, nous avons dû définir et configurer les paramètres de fonctionnement. Les deux compartiments de la boîte expérimentale ont été utilisés. D'un côté, nous avons placé une LED en fonctionnement continu et de l'autre côté, une LED identique en alimentation pulsée.

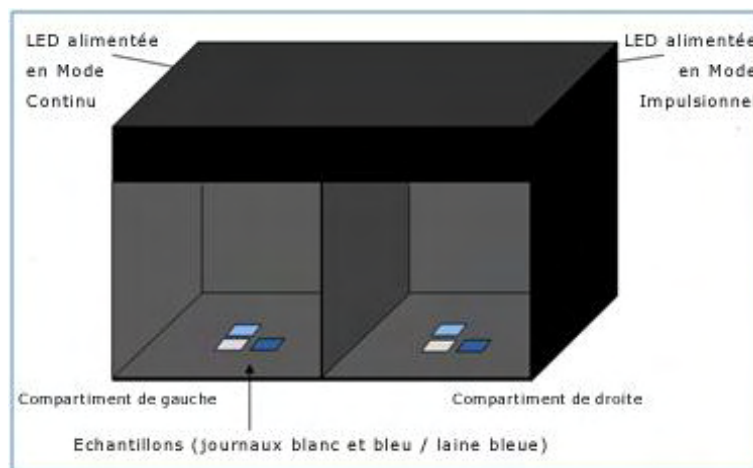


Figure 151 Dispositif expérimental

Les LEDs choisies sont des BRIDGELUX - BXRA-40E0810-A-00 - ES STAR 800LM à 4000K, avec une alimentation à 28V.

Nous avons choisi des LEDs avec une température de couleur à 4000K car elles présentaient une plus grande efficacité lumineuse que celle à 3000K utilisées jusqu'alors. L'intérêt pour l'étude de dégradation colorimétrique étant d'éclairer un maximum les échantillons le plus longtemps possible, comme nous l'expliquerons par la suite.

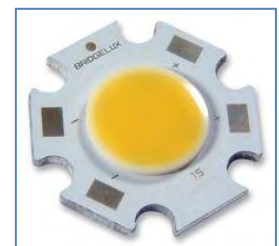


Figure 152 LED utilisée dans l'expérience

Les LEDs ont été positionnées sur le dessus et au centre de chaque compartiment à une distance de 55 cm de la base de la boîte. Nous ne plaçons pas de diffuseur et créons ainsi une lumière directe sur les échantillons.

Des échantillons normalisés qui se comportent comme un tissu ou papier sensible ont été placés à l'intérieur des compartiments. La salle où le dispositif expérimental a été placé est noire afin que seules les sources installées impactent sur les échantillons, et que nous puissions ainsi mesurer avec exactitude comment nos matériaux se dégradent sous la lumière des sources lumineuses LEDs choisies.

Sur la surface horizontale plane de la base de chaque compartiment, nous plaçons plusieurs échantillons d'environ 2 cm² :

- un échantillon de laine bleue qui est normalisé comme étant équivalent à la sensibilité d'un papier de faible qualité ou à un sujet très sensible comme la soie ;
- Un échantillon de papier journal de couleur unie blanc ;
- Un échantillon de papier journal de couleur unie bleue.

Les journaux sont faits de papiers très sensibles qui pourraient réagir comme l'échantillon de laine bleue normalisé.

Nous avons également conservé séparément et à l'abri de toute lumière un échantillon de laine bleue, qui n'a subi aucun dommage causé par la lumière et est utilisé comme échantillon de référence.

Le mode pulsé choisi ne doit pas être perçu visuellement comme scintillant. Aussi, suite à nos études précédentes, nous avons choisi un papillotement de la lumière ayant une fréquence de 80 Hz et un rapport cyclique de 50%. Ce papillotement de la lumière est rarement perçu consciemment et les paramètres de fréquence et rapport cyclique constituent des paramètres confortables quelle que soit la couleur de l'environnement et l'axe d'observation (sans toutefois être des paramètres de solutions Pareto-optimaux confortables).

Sous ces paramètres notre puissance d'alimentation est limitée et fixée à 4W. Nous travaillons en régulation de puissance, ainsi, nous réglons également en éclairage moyen. Tous les échantillons reçoivent le même éclairage moyen, que nous soyons en mode continu ou pulsé, égal à 635 lx.

Il a été démontré qu'il y a proportionnalité entre l'éclairage et le vieillissement de l'échantillon de laine bleue, et plus l'éclairage est élevé, et plus la dégradation le sera également. (79)

La dégradation du matériau est, en partie, due à des réactions photochimiques en raison de l'exposition à la lumière (norme CIE 157:2004) qui est le résultat des niveaux d'éclairage multipliés par la durée d'exposition.

Pour l'éclairage des musées, les recommandations données en lux.heure sont présentées dans le tableau suivant:

| Classification des matériaux | Norme ISO pour la laine bleue (Blue Wool Standard =BWS)* | Limite annuelle d'exposition lumineuse** |
|------------------------------|--|--|
| 1. Insensible | - | Pas de limite (pour la conservation) |
| 2. Faible sensibilité | 7 & 8 | 600 000 lxh/y |
| 3. Sensibilité moyenne | 4, 5 & 6 | 150 000 lxh/y |
| 4. Haute sensibilité | 1, 2 & 3 | 15 000 lxh/y |

Figure 153 Recommandations pour l'éclairage des musées

* Blue wool standard: c'est un test international pour la dégradation à la lumière des textiles. Il est composé d'un ensemble de 8 pièces de laine teintées chacune avec un colorant bleu différent et spécifique, classé pour s'estomper après une certaine exposition définie à la lumière.

**L'exposition annuelle à la lumière (H_m): Le niveau d'éclairement multiplié par le temps d'exposition à ce niveau par année d'exposition. Elle est exprimée en lux-heures par an (lx.h / y). Une année d'exposition au musée est d'environ 3000 heures.

2. Protocole expérimental

L'expérience a été réalisée pendant 1000 heures et les mesures ont été effectuées en moyenne toutes les 100 heures, parfois plus souvent pour mieux observer les phénomènes.

Les mesures comprennent l'enregistrement des valeurs d'éclairement, les coordonnées colorimétriques, la température de couleur, la luminance, mais aussi des caractéristiques d'alimentation comme la puissance, le courant, la tension et les commandes de régulation en courant exprimées en pourcent. Cela a été fait pour tous les échantillons de chaque compartiment : continu et pulsé.

Les mesures avec l'échantillon de référence n'ayant subi aucune lumière (non dégradé) ont été réalisées pour comparaison.

Les appareils de mesures photométriques utilisés dans notre laboratoire sont un chromamètre pour mesurer l'éclairement et température de couleur et un colorimètre pour enregistrer les valeurs de luminance et les coordonnées colorimétriques du diagramme de la CIE.

Pour mesurer la dégradation colorimétrique entre les deux échantillons de laine bleue après 1000 heures d'exposition, une autre méthode de mesure a été utilisée avec un équipement spécialisé développé par le Centre de Recherche de Restauration des Musées de France (C2RMF) et l'entreprise STILSA qui mesure la couleur d'œuvres d'art.

Cet appareil est un spectro-colorimètre à rétrodiffusion confocale qui réalise une mesure sans contact avec l'objet, et dont la différence de couleur par rapport à la référence est donnée directement (ΔE CIELAB 76).

Remarque : Il faut noter qu'il est difficile d'avoir deux diodes identiques, ce qui signifie que même si deux LEDs ont les mêmes paramètres d'achat et sont alimentées par une source d'alimentation avec les mêmes caractéristiques, elles ne peuvent pas avoir exactement les mêmes caractéristiques de base de part le pourcentage d'erreur due à la fabrication des composants. C'est aussi un paramètre spécifié par le fournisseur.

Par exemple les LEDs de température de couleur 4000K peuvent être comprises entre 3750K et 4250K. Et en effet, les LEDs utilisées dans notre expérience sont un peu différentes. Lorsque nous les avons mesurées, nous avons vu que la LED en mode continu a une température de couleur de 4230K tandis que celle en pulsé était à 4340K. Il est donc crucial de faire des mesures de comparaison avec notre échantillon de référence n'ayant subi aucune dégradation.

3. Résultats sur la régulation de puissance

Le graphique montre les variations de puissance moyenne tout au long des 1000 heures d'expérimentation, pour les deux LEDs (continu et pulsé).

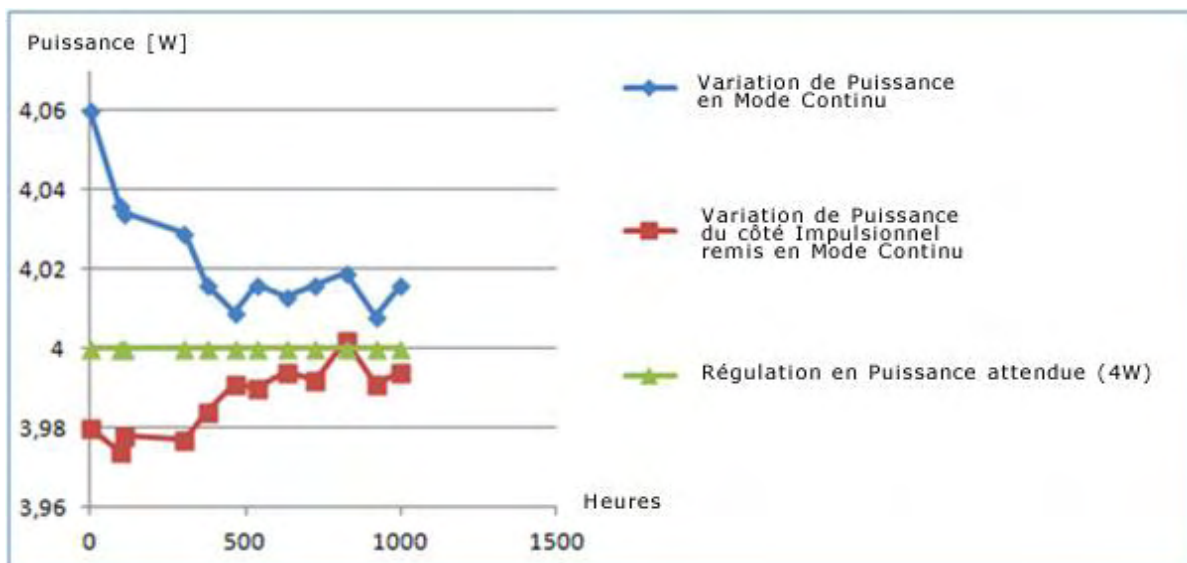


Figure 154 Régulation de puissance pour une commande de courant à 25 %

Comme nous travaillons en régulation de puissance, nous pouvons doubler le courant de la LED pulsée à 80Hz avec un rapport cyclique de 50% en lui changeant son rapport cyclique à 100%. La valeur de la commande est automatiquement fixée de telle sorte à avoir une puissance moyenne de 4W, et elle varie en théorie autour de 25% dans le mode continu et autour de 50% dans le mode pulsé.

Les graphiques ci-après montrent la commande de courant réelle pour les deux modes d'alimentation en régulation de puissance à 4W:

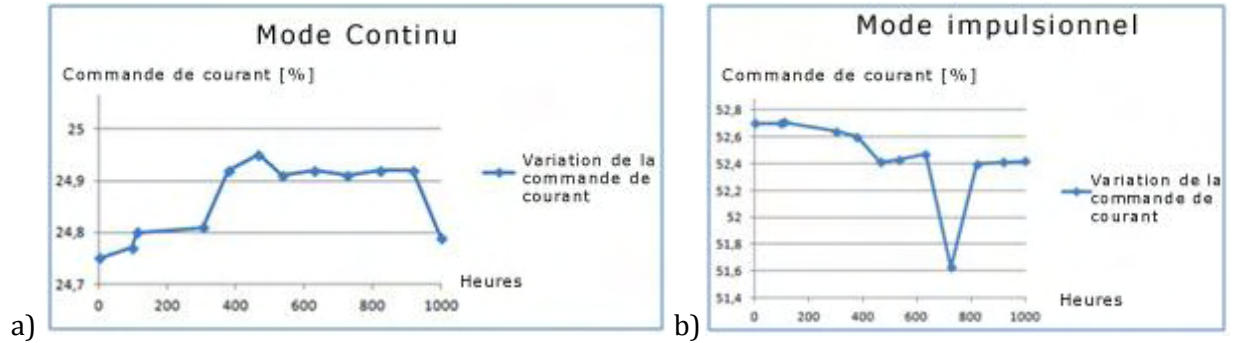


Figure 155 : a) Commande de courant en mode continu sur 1000 heures b) Commande de courant en mode pulsé sur 1000 heures

Nous ne sommes pas loin de la théorie, avec en moyenne 24,86% de commande en courant pour le mode continu et 52,46% pour le mode impulsionnel.

4. Résultat du vieillissement des LEDs.

Nous observons tout au long de l'expérience un vieillissement prématuré de la LED alimentée par impulsion. (Compartiment expérimental de droite). Pour mettre en évidence ce phénomène, deux séries de mesures ont été effectuées à chaque fois pour la LED pulsée :

- Une mesure en fonctionnement normal à 80 Hz avec un rapport cyclique de 50%
- Mais aussi une mesure lorsque cette même LED est réinitialisée en mode continu, soit à 80Hz avec un rapport cyclique de 100%.

Ensuite, nous avons remarqué tout au long des 1000 heures d'expérience, des variations d'éclairement, mais aussi des variations de température de couleur.

Les graphiques ci-dessous montrent respectivement la variation de l'éclairement et les différences de température de couleur mesurées dans chaque compartiment – LED pulsée et LED en continu.

a. Variations d'éclairéments

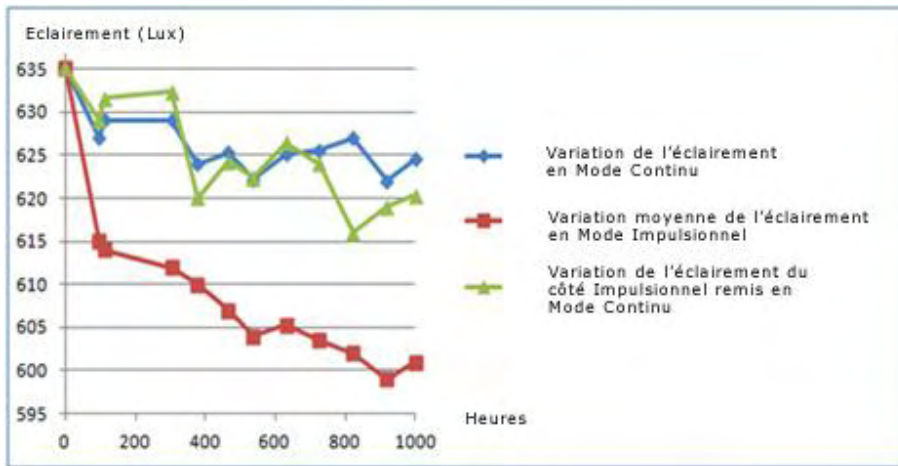


Figure 156 Comparaison de la variation d'éclairément sur 1000 heures.

Pour la LED alimentée en courant continu : l'éclairément a perdu 10 lux à la fin des 1000 heures.

Pour la LED alimentée en courant pulsé: dès les 100 premières heures, de petites variations d'éclairément commencent à apparaître. A la fin des 1000 heures de fonctionnement, l'éclairément à 80Hz, et 50% de rapport cyclique a perdu 35 lux. Par contre, lorsque nous remettons en mode continu cette même LED (soit 100% rapport cyclique), la LED n'a perdu que 15 lux, soit presque le même écart que pour la LED du compartiment en mode continu.

Le mode impulsionnel accentue donc les écarts d'éclairéments dus au vieillissement de la LED.

b. Variations de température de couleur

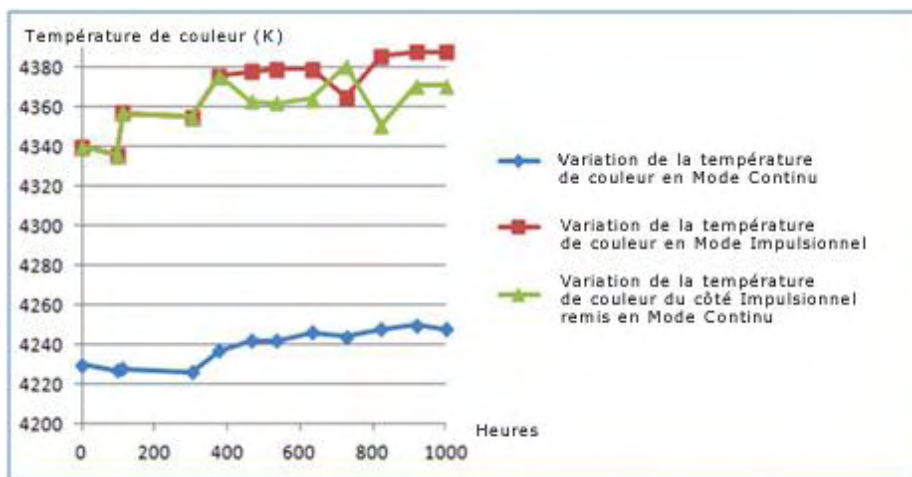


Figure 157 Comparaison de la variation de la température de couleur sur 1000 heures.

La différence de température de couleur après 1000 heures de fonctionnement en mode continu a montré un écart de 18 Kelvin.

Si nous nous intéressons maintenant au mode pulsé, nous observons qu'à 80Hz et 50% de rapport cyclique, la température de couleur a augmenté graduellement tout au long de l'expérience pour atteindre une différence de 40 Kelvin à la fin des 1000 heures.

Dès les 450 premières heures, une différence de température de couleur a commencé à s'observer côté impulsionnel quand nous sommes à 50% de rapport cyclique et quand nous le remettons en continu (100% de rapport cyclique.)

L'écart final après 1000 heures est seulement de 21 Kelvin, soit presque la même valeur qu'au compartiment en mode continu.

Le mode impulsionnel accentue donc les écarts de température de couleur dus au vieillissement de la LED.

5. Résultats colorimétriques des échantillons

a. Echantillon de laine bleue et échantillon de laine bleue de référence

Les graphiques suivants montrent la dégradation colorimétrique mesurée avec un colorimètre sous l'éclairage à LEDs. Les données sont ici reportées dans le diagramme de la CIE.

La lettre A est utilisée pour l'échantillon de laine bleue et B l'échantillon de laine bleue de référence. L'indice 0 juxtaposé à la lettre indique qu'il s'agit de la première mesure expérimentale (0 heure) et l'indice 1, la dernière mesure après 1000 heures d'expérience.

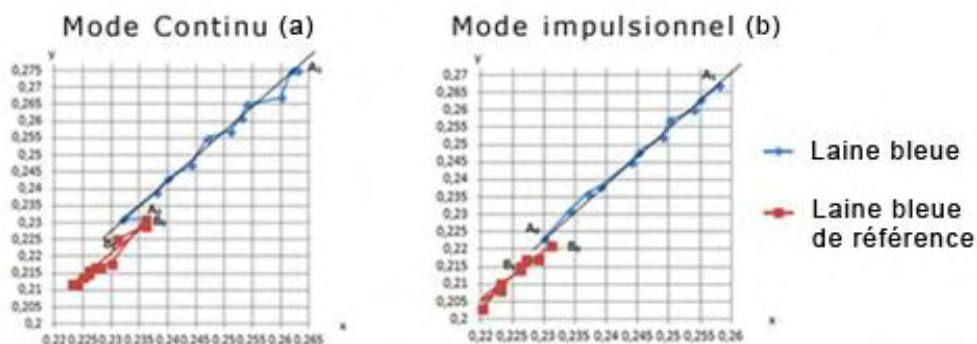


Figure 158 Points colorimétriques pour la laine bleue sur 1000 heures a) en Mode Continu b) en Mode Pulsé, dans un graphique CIE.

Pour les deux côtés, le point colorimétrique de l'échantillon de laine bleue de référence varie peu (en rouge sur les graphiques). Les erreurs sont de deux ordres: la mesure et les variations de paramètres des LEDs au cours des 1000 heures d'illumination. L'erreur finale est de 0,02 sur l'axe des x et aussi de 0,02 sur l'axe y.

Pour les échantillons tests dans chacun des modes d'alimentation, le point de couleur se déplace vers des coordonnées colorimétriques plus élevées, allant vers la couleur blanche : l'échantillon test blanchit. Ce blanchiment est aussi observé à l'œil nu depuis les 300 premières heures de test.

Si nous comparons la dégradation d'une manière colorimétrique, il apparaît que la pente de dégradation est un peu plus inclinée en mode continu qu'en mode impulsionnel.

Au regard de ce résultat, nous pourrions penser que la dégradation est un peu plus rapide dans le mode pulsé, mais nous devons tenir compte des coordonnées finales de couleur pour chaque côté. Nous avons donc besoin de faire des mesures avec le spectro-colorimètre à rétrodiffusion confocale, qui a sa source de lumière incorporée. (Conditions D65 et CIE31)



| Echantillon de laine bleue | L* | a* | b* | $\Delta E_{a^*b^*76}$ |
|---|------|-------|-------|-----------------------|
| Echantillon de Référence | 41.8 | 2.5 | -42.3 | |
| Echantillon soumis au mode continu | 49.7 | -6.0 | -27.1 | 19 |
| Echantillon soumis au mode impulsionnel | 49.8 | -6.21 | -27.4 | 18.9 |

Figure 159 Mesures avec le spectro-colorimètre RUBY, Conditions: D65 and CIE 31

Nous pouvons donc voir dans ces premiers résultats après 1000h à 635 lux (ou 635 000 lx.h) qu'il existe une différence de luminance et de point de couleur entre les couleurs des échantillons éclairés sous un courant continu ou par impulsion. La différence pour les deux modes d'alimentation est du même ordre, et est d'environ 19, ce qui est significatif car toute variation supérieure à 3 commence à être perceptible.

b. Comparaison de tous les échantillons de chaque côté

Nous avons ensuite cherché à déterminer si les résultats obtenus avec la laine bleue peuvent être confirmées avec l'échantillon de papier journal.

Comme mentionné ci-dessus, trois échantillons de tests ont été placés de chaque côté: la laine bleue, et également deux échantillons de journaux: un blanc et l'autre de couleur, coloré par de l'encre bleue.

Les données sont présentées dans le graphique de la CIE. Comme précédemment, un code lettre et index permettent de connaître le point obtenu par la première mesure, index 0 et le point final

après 1000h, index 1. La lettre A est utilisée pour la laine bleue, B pour le papier journal blanc, et C pour le papier journal bleu.

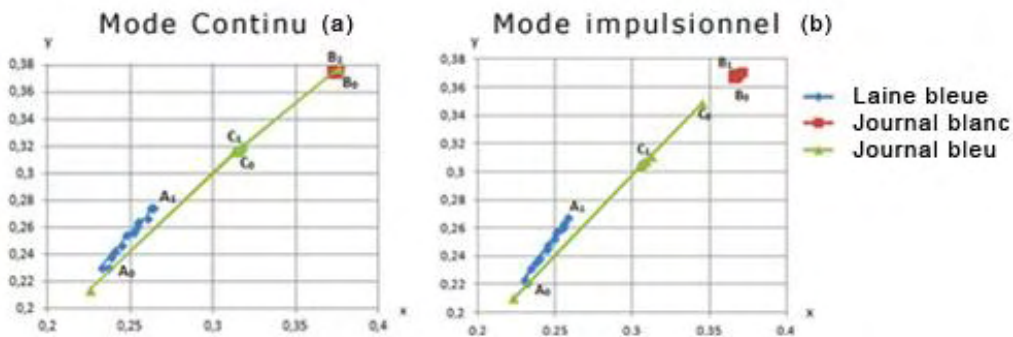


Figure 160 Point colorimétrique pour tous les échantillons sur 1000 heures a) en Mode Continu b) en Mode Pulsé, dans le graphique CIE.

Nous observons que pour les deux modes d'alimentation, le papier journal blanc ne se dégrade pas.

Pour le papier journal bleu, il est difficile de conclure, d'autant que certaines mesures se voient excentrées ou se déplaçant dans le sens inverse d'une dégradation. Il semble toutefois qu'en mode continu, il n'y ait pas de dégradation.

Mais quoi qu'il en soit, nous observons que la laine bleue est bien plus sensible que les papiers journaux que nous avons utilisés ici.

6. Conclusion

Nous venons donc de voir ici une des applications du papillotement de la lumière. De nombreux résultats ont été obtenus avec cette expérience préliminaire sous 635000 lx.h, soit une année d'éclairage d'œuvre d'art dans un musée.

Nous avons, pour résumer, mesuré une dégradation colorimétrique significative pour l'échantillon normalisé de laine bleue sous notre éclairage à LED, que se soit en mode d'alimentation pulsé ou continu. Les échantillons ont blanchi et ceci a commencé à être visuellement perceptible dès 470 heures d'éclairage.

Le résultat le plus surprenant étant que cet écart de dégradation colorimétrique est le même quelque soit le mode d'alimentation.

Après mesures des paramètres des LEDS, nous avons également pu conclure que le mode d'alimentation pulsé affectait immédiatement les valeurs d'éclairage et de température de couleur, ceci s'amplifiant avec le temps. En effet, lorsque nous remettons notre LED pulsée en mode continu, les valeurs d'éclairage et de température de couleur revenaient à des valeurs proches de celles obtenues pour la LED de l'autre compartiment ne fonctionnant qu'en mode continu. Ceci pourrait s'expliquer considérant la LED elle-même.

« Il n'est pas rare que les 1000 premières heures d'une vie de LED soient chaotiques dans des conditions normales, aussi il devient plus difficile d'expliquer ce qui se passe dans un mode de fonctionnement différent où les changements en fréquence et rapport cyclique des impulsions vont ajouter de nouvelles contraintes », nous explique Laurent Massol, directeur de LED Engineering Development lors d'un entretien. Rappelons que, dans notre cas, les variations d'éclairage ont commencé à apparaître dès les 100 premières heures, et les variations de température de couleur après 450 heures.

Si nous considérons maintenant la brillance ressentie par notre LED pulsé, nous pouvons nous attendre à ce que visuellement parlant, les observateurs d'œuvres d'art ressentent une brillance plus grande pour une alimentation en mode pulsé qu'en mode continu. (De par l'effet Broca Sulzer que nous avons vérifié dans notre laboratoire).

Ceci nous permet ainsi de diminuer le niveau d'éclairage du mode pulsé pour parvenir au même ressenti visuel qu'en mode continu, et donc de diminuer la puissance de notre régulation. Des économies d'énergie sont ainsi envisageables.

CONCLUSION

Dans ce manuscrit nous avons présenté des données empiriques, tant sur la physique de la lumière que sur les mécanismes de perception visuelle, en mettant l'accent sur le papillotement de lumière, sujet de nos études expérimentales.

Il nous a tout d'abord paru nécessaire de réaliser une réflexion physico-psycho-cognitive autour des notions de « confort », « qualité de vie » et « bien-être » appliquées au domaine de la perception visuelle de la lumière. Ceci nous a par la suite permis de mieux classifier les termes de sécurité, productivité, fatigue, etc. Une approche plus poussée de cette réflexion serait intéressante à mener, non seulement dans le domaine du confort visuel mais également à appliquer plus largement à la thermique, qualité de l'air, acoustique,..., soit tous les corps de métiers en relation avec l'habitat et mêlant une interaction Humaine.

Ensuite, une série de phases expérimentales phénoménologiques ont été menées. Elles ont principalement consisté en l'étude des limites de perception consciente du papillotement de lumière pour des observateurs emmétropes, placés dans divers environnements colorés, ou ayant des axes de perception visuelle variables. Rappelons-le, le stimulus lumineux est dans notre cas indirect à champ large, et le papillotement de la lumière est créé par des diodes électroluminescentes (LED) pour lesquelles nous faisons varier la fréquence et le rapport cyclique. Les conditions visuelles sont photopiques ou fin mésopiques sur certains cas.

L'utilisation de la méthode d'optimisation a mis en évidence des couples de solutions [fréquence ; rapport cyclique] Pareto optimaux, que nous avons filtrés de telle sorte à ce que ces couples de solutions physiques deviennent des couples de solutions physiques Pareto optimaux confortables. Cette méthode s'est révélée très intéressante et sera utilisée par la suite pour les études à venir.

D'ailleurs, une autre étude serait la perception visuelle du papillotement de lumière dans divers environnements couplés à du mouvement et suivant différents angles. Ceci permettrait d'obtenir, après application de la méthode d'optimisation, des couples de solutions physiques [fréquence rapport cyclique] Pareto optimaux confortables, dont les applications directes seraient l'éclairage public. En complément, toujours dans un enjeu énergétique n'allant pas au détriment des ressentis Humains, des études de gradation de lumière pulsée pourront être réalisées en ne considérant que des paramètres de solutions Pareto optimaux.

Des études préliminaires sur quelques cas d'amétropie ont également été réalisées. Elles ont permis de révéler des tendances sur la perception visuelle consciente du papillotement de lumière, mais nécessiteront un plus large panel d'observateurs pour nous donner des tendances réelles, ce que nous souhaitons réaliser par la suite. De même, des études sur la perception visuelle consciente du papillotement de lumière lorsque les observateurs sont atteints de pathologies (Alzheimer notamment) constitue une autre perspective, dont les applications concerneront le milieu hospitalier.

L'Effet Broca Sulzer a été vérifié dans le cadre de nos expériences, ce qui nous incite à continuer la caractérisation de la brillance ressentie, ainsi que sa quantification. Pour cela, nous étudierons plusieurs niveaux de puissance.

L'étude de la perception visuelle inconsciente du papillotement de lumière sera également très intéressante à approfondir et nécessitera des mesures via électrorétinogrammes (ERG), et électroencéphalogrammes (EEG). Ceci nous révélera jusqu'à quelles fréquences nos stimuli sont reçus par la rétine, et ensuite par le cerveau. Ainsi, ceci nous permettra de rentrer plus en détail sur les processus sous-jacents induits par perception de la lumière.

De part nos recherches sur la vision et l'optique (**ANNEXE 6**), un travail de modélisation optique de l'œil humain s'avèrera intéressant. Il permettra de comparer les perceptions visuelles spatiales en fonction de caractéristiques ophtalmologiques variables. Par la suite, ceci pourrait nous permettre de modéliser les perceptions visuelles temporelles, et donc la perception du papillotement de lumière.

BIBLIOGRAPHIE

1. **FLEURY, P. et MATHIEU, J.P.** Rayonnement et matière. *Lumière : physique générale et expérimentale*. Paris : Edition Eyrolles, 1961, 1.
2. **F. Cabestaing.** Traitement d'images. <http://lagis-vi.univ-lille1.fr/>. [En ligne] <http://lagis-vi.univ-lille1.fr/~fc/files/seance-1-introduction.pdf>.
3. **Alzieu, Vincent.** Danger des LED : nos mesures, ce que dit vraiment le rapport. Calme ! *lesnumeriques*. [En ligne] <http://www.lesnumeriques.com/danger-led-nos-mesures-dit-vraiment-rapport-calme-n16280.html>.
4. Lighting fundamentals. *ip2013.eap.gr*. [Online] [Cited: 09 02, 2013.] http://ip2013.eap.gr/pdf/GR_Topalis_Lighting_fundamentals.pdf.
5. **Zissis, Georges.** Eclairage - Photométrie & Colorimétrie. *clubeea.org*. [En ligne] www.clubeea.org/documents/mediatheque/Eclairage.ppt.
6. **Marie-Christine, Zélem.** *Politiques de maîtrise de la demande d'énergie et résistances au changement*. Paris : L'Harmattan, 2010. 978-2-296-11438-8.
7. **BEU, Dorin.** Light and health. *ip2013.eap.g*. [Online] http://ip2013.eap.gr/pdf/RO_Beu_part2-2.pdf.
8. **THELLIER, Françoise.** *HDR - L'Homme et son Environnement Thermique - Modélisation*. Toulouse : s.n., 1999.
9. **SANDER, David et SCHERER, Klaus.** *Traité de psychologie des émotions*. Paris : Dunod, 2009. pp. 44-45. ISBN 978-2-10-052139-5.
10. TRAITÉ DE PSYCHOLOGIE DES ÉMOTIONS. <http://excerpts.numilog.com>. [En ligne] <http://excerpts.numilog.com/books/9782100521395.pdf>.
11. **Sander*, David, Grandjean, Didier and Scherer, Klaus R.** A systems approach to appraisal mechanisms in emotion. <http://cms2.unige.ch/>. [Online] 2005. http://cms2.unige.ch/fapse/EmotionLab/Publications_files/SanderGrandjeanScherer_2005_neural_netw.pdf.
12. **Pierre, Vincent.** *Le Corps humain*. Paris : vuibert, 1983. 2-7117-5223-2.
13. **Damelincourt, Jean-Jacques, et al.** *Eclairage d'intérieur et ambiances visuelles*. [éd.] Lavoisier. Paris : Tec et doc, 2010. 978-2-7430-1208-3.

14. **Gregory, Richard L.** *L'oeil et le cerveau*. Bruxelles : De Boeck, 2000. 2-7445-0067-4.
15. Champ visuel. *ophtalim*. [En ligne] Le Réseau des Ophtalmo Limousin, 16 08 2011. [Citation : 09 02 2013.] <http://ophtalim.com/prise-en-charge/examens-complementaires/champ-visuel>.
16. le confort visuel. *energie.arch.ucl.ac.be*. [En ligne] Architecture et Climat. [Citation : 02 09 2013.] http://www-energie.arch.ucl.ac.be/eclairage/guide_confort.htm.
17. Limitation de la profondeur de Relief. *cin 3d*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] <http://www.cine3d.ch/cine3d/theorie/quest-ce-que-la-stereoscopie/315-limitation-de-la-profondeur-de-relief/>.
18. *Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye? - Rapport ANSES*. **F. Behar-Cohen, C. Martinsons, F. Viénot, G. Zissis, A. Barlier-Salsi, J.P. Cesarini, O. Enouf**. s.l. : elsevier, 07 2011, Progress in retinal and eye research, Vol. 30, pp. 239–257. 1350-9462.
19. Réflexe. *techno-science.net*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=953>.
20. **Buser, P. et Imbert, M.** *neurophysiologie fonctionnelle IV*. Paris : Hermann, 1987. 2 7056 6031 1.
21. **Serge PICAUD, Dr, Directeur de recherche INSERM, HDR, UPMC, INSERM UMR_S968, CNRS UMR 7210, Institut de la vision,**
22. **Gargasson, Florence Rigaudière et Jean-François Le.** III-2. La neurorétine : aspects fonctionnels, Oeil et Physiologie de la Vision, III-La physiologie rétinienne. <http://lodel.irevues.inist.fr>. [En ligne] 2 09 2013. <http://lodel.irevues.inist.fr/oeiletphysiologiedelavision/index.php?id=215>.
23. Lecture 10 - Photochromic interval, Purkinje shift, Dark adaptation. <http://arapaho.nsuok.edu/>. [Online] [Cited: 09 02, 2013.] http://arapaho.nsuok.edu/~salmonto/vs2_lectures/Lecture10.pdf.
24. Colorimétrie. <http://tchenne.pagesperso-orange.fr>. [En ligne] [Citation : 2 09 2013.] <http://tchenne.pagesperso-orange.fr/colorimetrie-91.html>.
25. *Colour perception and lighting - Metrics for assessing the quality of lighting in the colour rendering - LiDe*. **Sotiropoulou, Sophia**. 2013.
26. **Rigaudière, Florence.** «III-1 : LA RETINE : ORGANISATION SCHEMATIQUE», Oeil et physiologie de la vision [En ligne], III-La physiologie rétinienne. <http://lodel.irevues.inist.fr/>. [En ligne] 18 06 2013. [Citation : 02 09 2013.] <http://lodel.irevues.inist.fr/oeiletphysiologiedelavision/index.php?id=212>.
27. Rappels de photométrie et colorimétrie, Approche fondamentale d'un éclairage à LED - Partie 1. *cap-recifal.com*. [En ligne] 30 08 2011. [Citation : 02 09 2013.] http://www.cap-recifal.com/page/articles.html/_/materiel/rappels-de-photom%C3%A9trie-et-colorim%C3%A9trie-r47.

28. Couleurs primaires. *toutes-les-couleurs.com*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] <http://www.toutes-les-couleurs.com/couleurs-primaires.php>.
29. Hering et la théorie. *profil-couleur.co*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] <http://www.profil-couleur.com/lc/010-couleur-opposees.php>.
30. **Chrissent, Alain, et al.** *Communiquer par la couleur*. Paris : 3C CONSEIL, 1994. 2-9508797.
31. Radiométrie et photométrie. *photo-lovers.org*. [En ligne] 23 03 2009. [Citation : 02 09 2013.] <http://www.photo-lovers.org/photometry.shtml.fr>.
32. **Abney, W., & Festing, E.** *Color in photometry*. s.l. : Philosophical Transaction of the Royal Society of London, 1886. pp. 423-456. Vol. 177.
33. *Loi d'Abney et théorie de la vision chromatique*. **Piéron, H.** 1940, L'année psychologique, Vol. 41-42, pp. 125-135. 10.3406/psy.1940.5878.
34. **Fernandez-Maloigne, Christine.** *Les Modèles d'Apparence Couleur*.
35. *Manuel d'Eclairagisme*. Eindhoven : NV Philips' Gloeilampenfabrieken, 1976. Vol. Chapitre 1.2.
36. *Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD)*. **LUCKIESH, Matthew et GUTH, SYLVESTER K.** 11, 1949, Illuminating Engineering, Vol. 44, pp. 650-670.
37. **Nourtier, Alain.** Eclairagisme. *phys.u-psud.fr*. [En ligne] 2009. <http://www.phys.u-psud.fr/doc/Ergonomie/Eclairagisme.pdf>.
38. **Bien, Zbigniew Hanzelka & Andrzej.** Voltage Disturbances Flicker. [Online] 2006. [Cited: 09 01, 2013.] <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/downloads/pqug/514-flicker.pdf>.
39. **Georges Zissis, Spiros Kitsinelis, Lydie Arexis Boisson.** *Etude comparative des effets stroboscopiques d'un échantillon de systèmes d'éclairage*. ANSES. 2011.
40. **Willmorth, Kevin.** LIGHTING APPLICATION PERSPECTIVE Questions of modulation in context with lighting and product design. [Online] [Cited: 09 01, 2013.] www.lumenique.com.
41. **Grather, Michael.** The Evaluation Evaluation. *cormusa.org*. [Online] [Cited: 09 02, 2013.] http://www.cormusa.org/uploads/CORM_2009_-_The_Evaluation_of_Flicker_in_LED_luminaires_Grather.pdf.
42. **Luu, Charles and Kalloniatis, Michael.** Temporal Resolution. [Online] 2007. [Cited: 09 01, 2013.] <http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/temporal-resolution/>.
43. *Analysis of Nonlinearities in the Flicker ERG*. **al., Burns et.** 1992.
44. *Human electroretinogram response to video display, fluorescent lighting and other high frequencysources*. **SM, Berman, et al.** 8, 1991, Optom Vis Sci, Vol. 68, pp. 645-62.

45. A Review of the Literature on Light Flicker: Ergonomics, Biological Attributes, Potential Health Effects, and Methods in Which Some LED Lighting May Introduce Flicker. [Online] 2010 йил 02-26. <http://grouper.ieee.org/groups/1789/>.
46. résolution. *cnrtl.fr*. [En ligne] <http://www.cnrtl.fr/lexicographie/r%C3%A9solution>.
47. **Wilkins, Arnold J.** *Visual stress*. Timothy Shallice, James L. McGaugh, Anne Treisman, Nicholas J. Mackintosh, Endel Tulving, Lawrence Weiskrantz. s.l. : Oxford Psychology series.
48. *Visual response to time-dependent stimuli: I. amplitude sensitivity measurements.* **DH, Kelly.** 1961, Journal of the Optical Society of America, Vol. 51, pp. 422–429.
49. *Contrast sensitivity and retinal ganglion cell responses in the primate.* **Lee, Barry B. and Sun, Hao.** n.1, 09 7, 2013, Psychol. Neurosci., Vol. vol.4, pp. 11-18. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-32882011000100003&lng=en&nrm=iso>. ISSN 1983-3288.
50. *Forme des courbes de sensibilité au contraste des mécanismes colorés isolés en vision fovéale et périphérique.* **Bourdy C., Vienot F., Monot A., Chiron A.** n°1, s.l. : L'année psychologique, 1982, Vol. vol. 82, pp. 19-27. doi : 10.3406/psy.1982.28405.
51. **de Lange, H.** 48, 1958, J. Opt. Soc. Am., pp. 771-783.
52. **Sidebottom, Shane.** Effects of Illumination and Viewing Angle. *scholar.lib.vt.edu*. [Online] 04 1997. [Cited: 09 01, 2012.] <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-4229173039731191/unrestricted/flicker.pdf>.
53. *The impact of flicker from fluorescent lighting on wellbeing, performance and physiological arousal.* **Küller R, Laike T.** 1998, Ergonomics, Vol. 41, pp. 433-447.
54. *Modulation of fluorescent light: flicker rate and light source effects on visual performance and visual comfort.* **Veitch JA, McColl SL.** 4, 1995, Lighting Research and Technology, Vol. 27, pp. 243-256.
55. *Human EEG responses to 1–100 Hz flicker: resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena.* **CS, Herrmann.** s.l. : Exp. Brain Res., 2001, Vol. 137, pp. 346-353.
56. *Vision Science II, Monocular Sensory Aspects of Vision.* s.l. : Examination, 1999, Vol. II.
57. **Brown, J. L.** in *Vision and Visual Perception*. (Wiley, New York : Graham, 1965.
58. **Matin, L.** 1968, J. Opt. Soc. Am., Vol. 58, pp. 404-415.
59. **Kelly, D. H.** 1971, J. Opt. Soc. Am., Vol. 61, pp. 537-546.
60. **M. JINNO, K. Morita, M. Abe, Y. Tomita and H. Motomura.** *The Human Perception Enhancement of LED by using Pulsed Operation*. Ehime : Ehime University.

61. **Michael Kalloniatis, Charles Luu.** <http://webvision.med.utah.edu>. *Temporal Resolution*. [En ligne] 03 09 2013. <http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/temporal-resolution/>.
62. **Bullough, John D., Skinner, Nicholas P. and Hickcox, Kathryn Sweater.** *Visual Performance and Perceived Lighting - Quality Under Flickering Illumination*. Rensselaer : Lighting Research Center, 2012.
63. *Experiment on Visual Perception of Pulsed LED Lighting – Can it save energy for lighting? –*. **Irena Fryc, Wendy Davis, Yoshi Ohno.** Bialystok University of Technology, Poland and National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA : s.n.
64. *Effects of flicker characteristics from solid-state lighting on detection, acceptability and comfort.* **PhD, JD Bullough, et al.** Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, USA : s.n., 2011.
65. *Intermittent illumination from visual display units and fluorescent lighting affects.* **AJ, Wilkins.** 1986, Human Factors, Vol. 28, p. 7581.
66. *Fluorescent lighting, headaches and eye-strain.* **AJ, Wilkins, IM, Nimmo-Smith and A, Slater.** 1989 : Lighting Research and Technology, Vol. 21, pp. 11-16.
67. **RS, Fisher, et al.** *Patterninduced Seizures: A Review for the Epilepsy Foundation of America Working Group.* *Epilepsia.* s.l. : Photocand, 2005.
68. *POWER SYSTEMS ENGINEERING, SPECIAL ASSIGNMENT ESPOO.* **Teikari, Petteri.** HELSINKI : s.n., 2006.
69. **Malet, Florence.** *LENTILLES DE CONTACT RAPPORT SFO 2009.* s.l. : Elsevier Masson, 2009.
70. **Harding GFA, Jeavons PM.** Épilepsie photosensible. *epilepsymatters.com*. [En ligne] MacKeith Press, 1994. [Citation : 02 09 2013.] <http://www.epilepsymatters.com/french/faqphotosensitive.html>.
71. *continuously lit stimulus is perceived to be.* **Noritake A, Kazai K, Terao M, Yagi A. A.** 18, 2005, Spatial Vision, pp. 297–316.
72. **JL, Brown.** *Flicker and intermittent stimulation Perception.* New York : Wiley, 1965.
73. **Sherif Shady, Donald I. A. MacLeod*, and Heidi S. Fisher.** *Adaptation from invisible flicker.* San Diego : Dale Purves, 2004.
74. **Raclot, Claude.** défauts de l'oeil. *chimix.com*. [En ligne] [Citation : 01 09 2013.] www.chimix.com/devoirs/spe036.htm.
75. **Morel, Philippe.** Protubérances solaires : de la couleur à la résolution. *astrosurf.com*. [En ligne] Société Astronomique de France. [Citation : 01 09 2013.] http://www.astrosurf.com/saf/articles/Protu_Couleurs/Protu_couleurs.htm.

76. *Multiobjective optimisation of lighting installations taking into account user preferences - a pilot study.* **Labayrade, C. Villa and R.** s.l. : Lighting Research and Technology, April 2013, Vol. 45, pp. 176-196. 10.1177/1477153511435629.
77. **C., Villa.** *Optimisation multicritère prenant en compte les préférences de panels de sujets. Application à l'éclairage de bureaux.* Vaulx-en-Velin, France : s.n., 2012. Thèse de doctorat ENTPE.
78. **Metz, Daniel.** Qu'est-ce que la brillance d'une couleur ? *blog-couleur.com*. [En ligne] 01 06 2006. [Citation : 01 09 2013.] <http://www.blog-couleur.com/?Qu-est-ce-que-la-brillance-d-une>.
79. *LED flicker : A drawback or an opportunity ?* **Spiros Kitsinelis, Lydie Arexis-Boisson, Yuan Zhang, Georges Zissis.** 2013, Optics and Photonics Journal, Vol. 3, pp. 63-66.
80. **Thomson, Garry.** *The museum Environment.* London : Butterworths, 1978. pp. 21-22.
81. LES VOIES ET CENTRES VISUELS. *Site personnel de Paul Jean.* [En ligne] 13 04 2011. [Citation : 02 09 2013.] <http://p.jean2.pagesperso-orange.fr/anat/voies.htm>.
82. **Jauzein, Françoise.** Différentes voies visuelles. *ACCES.* [En ligne] 12 04 2010. [Citation : 02 09 2013.] http://acces.ens-lyon.fr/acces/ressources/neurosciences/vision/comprendre/vision_scientifique/differentes_voies_visuelles.
83. **Prof. Grega Bizjak, PhD.** Nonvisual effects. <http://ip2013.eap.gr/>. [Online] [Cited: 09 02, 2013.] http://ip2013.eap.gr/pdf/SI_Bizjak_Nonvisual_efects_of_light_1.pdf.
84. *systeme-nerveux-peripherique- l'activité réflexe.* [En ligne] [Citation : 2 09 2013.] <http://natyinfirmiere.files.wordpress.com/2010/10/systeme-nerveux-peripherique.pdf>.
85. *Rod and cone photoreceptors : Molecular basis of the difference in their physiology.* **Satoru Kawamura, Shuji Tachibanaki.** 150, s.l. : Elsevier, 04 26, 2008, Comparative Biochemistry and Physiology, Part A, pp. 369-377.
86. **Austin Roorda, PhD.** VS 212A Proseminar Optics and Dioptrics of the Eye. <http://roorda.vision.berkeley.edu>. [Online] [Cited: 09 2, 2013.] <http://roorda.vision.berkeley.edu/Proseminar/ProSemVS212A-2012.pdf>.
87. *Evaluation of Glare Effects for Atifical lighting Installation.* **Chong-Jhieh Jiang, Xian-Min Chiu, Pin-Hsuan Hsieh.** [ed.] National Central University, Taiwan Department of Optics and Photonics/Institute of Lighting and Display Science. 2010.
88. **Berg, Tom van den.** Retinal straylight in the human eye. <http://roorda.vision.berkeley.edu>. [Online] [Cited: 09 2, 2013.] <http://roorda.vision.berkeley.edu/Proseminar/ProSemVS212A-2012.pdf>.
89. Aberration chromatique longitudinale. *futura-sciences.* [En ligne] [Citation : 02 09 2012.] <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/physique-aberration-chromatique-longitudinale-5196/>.

90. Aberration sphérique. *futura-sciences*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/physique-aberration-spherique-5193/>.
91. Puissance et astigmatisme régulier. *dicoptic.izispot*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] http://www.dicoptic.izispot.com/aberrometrie_aberrations_de_haut_degre_865.htm.
92. Systèmes Optiques - Front d'onde et tache image. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] <http://www.institutoptique.fr/content/download/1164/8141/file/Front%20d%20E2%80%99onde%20et%20tache%20image.pdf>.
93. **X, ZANLONGHI**. LA VISION DE LA PERSONNE AGEÉ. *.ophtalmo.net*. [En ligne] 08 08 2006. [Citation : 02 09 2013.] http://www.ophtalmo.net/bv/GP/IndexGP/G/Vision_normale/vn-age.htm.
94. Les diagnostics prénatal et préimplantatoire. *etatsgenerauxdelabioethique.fr*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] <http://www.etatsgenerauxdelabioethique.fr/uploads/rubriques/fiche-diagnostics-prenatal-et-preimplantatoire-pdf.pdf>.
95. épidémiologie. *LAROUSSE*. [En ligne] 2006. [Citation : 02 09 2013.] <http://www.larousse.fr/archives/medical/page/341#t12849>.
96. **Mias, Dr Lucien**. Déficience, incapacité, handicap. <http://papidoc.chic-cm.fr/>. [En ligne] 18 01 1995. [Citation : 02 09 2013.] <http://papidoc.chic-cm.fr/562incapahandicap.html>.
97. Les déficiences visuelles. *ac-lyon.fr*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] http://www2.ac-lyon.fr/etab/ien/rhone/st_priest/spip/IMG/pdf/Les_deficiences_visuelles.pdf.
98. **Professeur Jocelyn Faubert, de l'École d'optométrie**. Qu'est-ce que le daltonisme ? Comment affecte-t-il la perception colorée ? A partir de quel degré le daltonisme est-il un handicap ? <http://jacquesbave.free.fr>. [En ligne] [Citation : 2 09 2013.] <http://jacquesbave.free.fr/Menu.html/T.P.E/pages%20web/Le%20daltonisme%20comme%20handicap.htm>.
99. La vision des couleurs et le daltonisme. *Ophtasurf*. [En ligne] 2010. [Citation : 02 09 2013.] <http://ophtasurf.free.fr/lavision.htm>.
100. Dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA). *inserm.fr*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] <http://www.inserm.fr/thematiques/neurosciences-sciences-cognitives-neurologie-psychiatrie/dossiers-d-information/degenerescence-maculaire-liee-a-l-age-dmla>.
101. Rétinopathie diabétique - Signes cliniques et évolution spontanée. *Site Internet de l'Institut de la Vision*. [En ligne] 07 07 2011. [Citation : 02 09 2013.] http://www.institut-vision.org/index.php?option=com_content&view=article&id=262&Itemid=150&lang=fr&limitstart=2.
102. **Lainé, Sarah**. Alzheimer. *Doctissimo*. [En ligne] [Citation : 02 09 2013.] <http://www.doctissimo.fr/html/dossiers/alzheimer/11746-alzheimer-stades-maladie.htm>.

103. **Jeanette Rosa-Brady and Tracy Dunne, Ph.D.**, Vision Problems Associated with Alzheimer's Disease. [Online]
www.alz.org/centralohio/documents/vision_problems_associated_with_alzheimers.doc.
104. **Daniel Bolduc, psychologue, IRD, et al.** Les hallucinations et les pertes sensorielles. [En ligne] 2008. [Citation : 02 09 2013.] http://raymond-dewar.qc.ca/doc/hallucinations_pertes_sensorielles.pdf.
105. **Harding, G.F.A. and Jeavons, P.** *Photosensitive Epilepsy*. s.l. : Mac Keith Press, 1994.
106. **Sousa, Alain.** Epilepsie. *Doctissimo*. [En ligne] 2000. [Citation : 01 09 2013.] <http://www.doctissimo.fr/html/dossiers/epilepsie/2280-epilepsie-pikatchu.htm>.
107. **nina67.** Température de couleur, courbe de Kruitof, effet Purkinje. <http://www.astuces-pratiques.fr/>. [En ligne] <http://www.astuces-pratiques.fr/high-tech/temperature-de-couleur-courbe-de-kruitof-effet-purkinje>.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|---|----|
| Figure 1 Spectre électromagnétique | 17 |
| Figure 2 Spectre du visible entre 380 nm et 780 nm (2) | 17 |
| Figure 3 Spectre de la lumière du jour (3) | 18 |
| Figure 4 Passage d'un flux énergétique à un flux lumineux - Schéma réalisé à partir d'un exemple de M. Topalis. (4) | 19 |
| Figure 5 Comparaison entre les grandeurs radiométriques et les grandeurs photométriques (5) .. | 20 |
| Figure 6 Schéma détaillant les différents types de génération de la lumière (5) | 21 |
| Figure 7 Répartition des consommations électriques pour l'éclairage en France (données de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME 2009)) | 22 |
| Figure 8 Besoins humains, par Marc Fontoynt de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) (7) | 23 |
| Figure 9 Qualité de l'éclairage (7) | 24 |
| Figure 10 Les interactions entre les divers domaines du confort sont de plusieurs types (8) | 26 |
| Figure 11 : Modèle des composantes de Scherer et de ses interactions avec d'autres systèmes fonctionnels tels que l'attention, la mémoire, la motivation, le raisonnement et le soi (10) | 28 |
| Figure 12 Qualité visuelle de la lumière (7) | 32 |
| Figure 13 Du confort visuel vers la qualité visuelle | 33 |
| Figure 14 Œil humain en coupe | 37 |
| Figure 15 : Schéma simplifié d'un œil humain sain | 38 |
| Figure 16 Schématisation de l'œil humain | 39 |
| Figure 17 Le triplet et ses composants : source-observateur-objet | 40 |
| Figure 18 Champ visuel horizontal d'un être humain (15) | 43 |
| Figure 19 Image de gauche : Champ visuel horizontal - Image de droite : champ visuel vu de face (Zone bleu : vision stéréoscopique) (16) | 43 |
| Figure 20 Marge d'accommodation (zone hachurée) d'un œil normal (12 p. 111) | 45 |
| Figure 21 Modification du pouvoir accommodatif avec l'âge (12 p. 111) | 45 |
| Figure 22 Distance minimale d'accommodation en fonction de l'âge | 46 |
| Figure 23 Convergence téléométrique. Les images sont centrées sur la fovéa pour différentes distances. Cas A : objet lointain, cas B : objet proche. L'angle de convergence fournit une information sur la distance comme un télémètre (12 p. 82) | 47 |
| Figure 24 Limite de Panum (17) | 48 |
| Figure 25 Transmission des UV dans un œil humain emmétrope, pour tout âge (21) | 50 |
| Figure 26 Plage d'éclairiments pour la vision humaine (4) | 51 |
| Figure 27 Plage de luminance pour la vision humaine | 51 |
| Figure 28 Ordre de grandeur de la vision de l'œil humain en considérant l'efficacité lumineuse (5) | 52 |
| Figure 29 La rétine humaine et ses photorécepteurs (82) | 53 |
| Figure 30 Schéma des cônes et bâtonnets de l'œil humain, photorécepteurs intervenant dans la vision (82) | 53 |

| | |
|---|----|
| Figure 31 Variation du diamètre pupillaire de la pupille: a) à la lumière et b) à l'obscurité (12 p. 112)..... | 55 |
| Figure 32 Eclairage rétinien D ou E_r en fonction de la luminance d'adaptation L (13 p. 50)..... | 57 |
| Figure 33 Acuité visuelle en fonction du niveau d'éclairage (4)..... | 59 |
| Figure 34 sensibilité relative des cônes (photopique en vert) et bâtonnets (scotopique en violet) (22)..... | 60 |
| Figure 35 Fonction d'adaptation à l'obscurité (« rods » signifie bâtonnets) (22)..... | 61 |
| Figure 36 Illustration du principe de vision d'un objet en couleur (23)..... | 62 |
| Figure 37 Répartition des cônes et bâtonnets sur la rétine. A gauche : localisation et densité de cônes et bâtonnets - A droite : rétine vue de face : cônes RVB en points rouges, verts et bleus et bâtonnets en points blancs (24)..... | 62 |
| Figure 38 Cônes Rouges (L), Verts (M) et bleus (S) – en couleur est représentée la membrane externe. (25)..... | 63 |
| Figure 39 Sensibilité spectrale des cônes de la CIE 1931- spectres $x'(\lambda)$: rouge, $y'(\lambda)$:vert, $z'(\lambda)$ bleu, avec λ en nm (26)..... | 64 |
| Figure 40 Sensibilité relative des photorécepteurs (représentation des cônes par des triangles et des bâtonnets par un rectangle)..... | 64 |
| Figure 41 Ajustement chromatique indépendant pour chaque cône (30)..... | 65 |
| Figure 42 Exemple d'ajustement chromatique (24)..... | 65 |
| Figure 43 Synthèse additive de la lumière colorée (27)..... | 66 |
| Figure 44 Les trois types de récepteurs du mécanisme d'opposition d'Hering (24)..... | 67 |
| Figure 45 Schéma de la théorie de zone (28)..... | 67 |
| Figure 46 Vision des couleurs : concordance physique, colorimétrie et sensation (29 p. 79)..... | 68 |
| Figure 47 Schéma présentant de gauche à droite : la luminosité, la saturation et la teinte (24)..... | 69 |
| Figure 48 Courbe de sensibilité spectrale de l'œil humain de la CIE 31 (30)..... | 69 |
| Figure 49 Graphe présentant la sensibilité relative spectrale de l'œil humain en vision photopique et scotopique..... | 70 |
| Figure 50 Système œil-rétine (14 p. 132)..... | 73 |
| Figure 51 Système Œil-tête (14 p. 132)..... | 74 |
| Figure 52 Echelle de luminance présentant des valeurs de luminances acceptables pour l'éclairage intérieur (34)..... | 80 |
| Figure 53 Luminance préférée L_c en fonction de la luminance du luminaire L_l . (34)..... | 80 |
| Figure 54 Facteur de position p (indice de Guth) par rapport à l'observateur et à l'axe du regard. La source est à la distance R , à la hauteur H et excentrée à T (13 p. 102)..... | 81 |
| Figure 55 Contraste seuil en fonction de la luminance de fond (36)..... | 83 |
| Figure 56 Diagramme de Blackwell pour des tâches visuelles courantes (34)..... | 84 |
| Figure 57 Correspondance des significations des indices DGR (Guth) et G (Söllner). (13 p. 106)..... | 85 |
| Figure 58 Position du regard de l'observateur par rapport à une source de lumière créant un éclairage horizontal..... | 85 |
| Figure 59 Courbe de luminances limites et éclairage horizontal selon Bodman et Söllner, avec en abscisse la luminance perçue (échelle log) dépendant de l'angle γ (en degré) en ordonnée..... | 86 |
| Figure 60 Classes d'éblouissement selon Söllner-Fischer (13 p. 106)..... | 86 |
| Figure 61 Signal aidant au calcul du taux de modulation et du papillotement de la lumière. (39) (40)..... | 89 |

| | |
|--|-----|
| Figure 62 Etudes du papillotement de la lumière de plusieurs sources (68) [<i>LBC : Lampe Basse Consommation</i>] | 91 |
| Figure 63 Expérience où des flashes de lumière sont présentés à l'œil. (a) Avec un court temps d'intégration (30ms) : les flashes sont détectés. (b) avec un long temps d'intégration (100ms) : les flashes ne sont pas perçus et le stimulus est apparu brillant (41) | 92 |
| Figure 64 Travaux de Kelly de 1931 présentant la sensibilité au papillotement de la lumière pour différents niveaux d'éclairiments moyens rétinien (en Troland). Un objectif de 60° avec des contours flous a été utilisé (sur les axes des ordonnées, la sensibilité absolue est l'inverse de l'amplitude de l'éclairiment)(51)..... | 95 |
| Figure 65 Courbes de sensibilité au contraste temporel en fonction de la fréquence du signal - par Kelly, aussi dites courbes de De Lange. A gauche avec indication des luminances en cd/m^2 (4), à droite avec indication de l'éclairiment rétinien en Troland (10 p. 131) | 96 |
| Figure 66 FFC et éclairiment rétinien à différentes excentricités du stimulus (20 p. 133) - Pupille artificielle de 1,8 mm. | 97 |
| Figure 67 FFC et éclairiment rétinien pour des stimuli centrés d'étendue variable.-pupille artificielle de 1,8 mm. | 98 |
| Figure 68 Sensibilité au papillotement de la lumière pour différents niveaux de taille d'une cible scintillante (seuil d'amplitude = modulation) : (a) cible lumineuse scintillante de 2° avec fond lumineux stable, b) cible lumineuse scintillante de 65°, c) cible lumineuse scintillante de 4° avec fond noir (51)..... | 98 |
| Figure 69 Sensibilité visuelle du papillotement de lumière pour un large diamètre de stimulus (courbe bleue), et un petit diamètre (courbe rouge) (55) | 99 |
| Figure 70 FFC et éclairiment rétinien, stimulus de différentes longueurs d'onde- stimulus de 19° entouré d'une plage de 35°. Couleurs en nm : a- 450 ; b- 490 ; c- 535 ; d- 575 ; e- 605 ; f-625 ; g- 670 - Abscisse : log de l'éclairiment rétinien, à corrélérer avec la luminance induite par le stimulus, vu qu'il y a une pupille artificielle de 1,8 mm. (19 p. 134) | 99 |
| Figure 71 FFC en fonction de l'éclairiment rétinien, démontrant la linéarité de la loi Ferry-Porter. | 100 |
| Figure 72 Illustration du phénomène Brücke-Bartley | 101 |
| Figure 73 Illustration de la loi de Talbot Plateau : La luminance ressentie pour un papillotement de la lumière de fréquence supérieure à la FFC est la luminance moyenne (59)..... | 101 |
| Figure 74 Brillance ressentie d'un flash comparé à sa luminance mesurée (59)..... | 102 |
| Figure 75 Variation de la brillance ressentie en fonction de la durée d'un flash d'intensité constante. | 102 |
| Figure 76 Brillance apparente (ou ressentie) de flashes avec des luminances variables et fonction de la durée du flash. Effet Broca et Sulzer (60)..... | 102 |
| Figure 77 Détection de l'effet stroboscopique en fonction de la fréquence et du pourcentage de modulation (66)..... | 103 |
| Figure 78 Acceptabilité de l'effet stroboscopique. (61) | 104 |
| Figure 79 Les deux expériences : vision directe et indirecte de la lumière colorée- mode continu comparé au mode pulsé. (59)..... | 104 |
| Figure 80 Boîte expérimentale | 105 |

| | |
|--|-----|
| Figure 81 A gauche : photographie de l'expérience au laboratoire à la place d'un observateur – A droite : positionnement des éléments par rapport au champ de vision de l'observateur situé en bas à gauche..... | 106 |
| Figure 82 Tableau présentant les neuf conditions expérimentales de l'étude. (63) | 107 |
| Figure 83 Valeur de luminances de quelques sources courantes de lumière artificielle (18) | 109 |
| Figure 84 Valeurs de luminances de quelques sources courantes (18) | 109 |
| Figure 85 Le groupe de risque et les valeurs limites de risque d'exposition à la lumière bleue de la norme EN 62471, qui définit un schéma de classification pour lampes et les systèmes de lampes, fondé sur la quantité de risques présents dans la lumière. (18) | 110 |
| Figure 86 Dispositif expérimental en élévation, vue de face et vue de profil..... | 115 |
| Figure 87 Le système d'alimentation électronique | 117 |
| Figure 88 Modulation par Largeur d'Impulsion (PWM) sur une période T – D : rapport cyclique.. | 118 |
| Figure 89 Rapports cycliques extrêmes et flicker index associés | 118 |
| Figure 90 Signal lumineux émis | 118 |
| Figure 91 Dispositif expérimental et positionnement de l'observateur – cas du fond sombre..... | 120 |
| Figure 92 Diamètres pupillaires et éclairement rétiens extrêmes pouvant survenir durant l'expérimentation (Formules p55)..... | 122 |
| Figure 93 Ordre des scenarii proposés | 123 |
| Figure 94 Résultats avec Fond sombre et Fond blanc..... | 124 |
| Figure 95 Ordre des scenarii et correspondance de l'appellation dans cette expérience (sens ascendants et descendant) | 126 |
| Figure 96 Ordre des scenarii présentés | 126 |
| Figure 97 Hypothèse des variations de détection des scenarii de papillotement de lumière..... | 127 |
| Figure 98 Résultats fond sombre : à gauche résultats 1ère et 3ème phase, à droite comparaison entre les deux phases..... | 128 |
| Figure 99 Résultats fond blanc : à gauche résultats 1ère et 3ème phase, à droite comparaison entre les deux phases..... | 128 |
| Figure 100 Résultats fond rouge : à gauche résultats 1ère et 3ème phase, à droite comparaison entre les deux phases..... | 129 |
| Figure 101 Résultats fond vert : à gauche résultats 1ère et 3ème phase, à droite comparaison entre les deux phases..... | 129 |
| Figure 102 Résultats fond bleu : à gauche résultats 1ère et 3ème phase, à droite comparaison entre les deux phases..... | 130 |
| Figure 103 Tableau bilan présentant les erreurs de détection | 130 |
| Figure 104 Spectre d'émission de la LED utilisée dans l'expérience | 132 |
| Figure 105 Résultats pour le fond sombre : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED..... | 133 |
| Figure 106 Résultats pour le fond blanc : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED..... | 133 |
| Figure 107 Résultats pour le fond rouge : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED..... | 134 |

| | |
|--|-----|
| Figure 108 Résultats pour le fond vert : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED..... | 134 |
| Figure 109 Résultats pour le fond bleu : a) Pourcentage de perception visuelle du papillotement de la lumière - b) pourcentages de perception visuelle du papillotement de la lumière pour chaque rapport cyclique : 20%, 50%, 80% - c) Spectre émis par ce fond éclairé par la LED..... | 135 |
| Figure 110 La sensibilité des cônes en fonction de la longueur d'onde (CIE 1931)..... | 136 |
| Figure 111 Résultats expérimentaux pour des personnes atteintes de myopie – Cas du fond sombre et du fond blanc..... | 138 |
| Figure 112 Résultats expérimentaux pour des personnes atteintes d'astigmatisme et myopie– Cas du fond sombre et du fond blanc | 139 |
| Figure 113 Résultats de perception visuelle du papillotement de la lumière sur fond sombre à 0°, 45° et 90°..... | 140 |
| Figure 114 Résultats de perception visuelle du papillotement de la lumière sur fond blanc à 0°, 45° et 90°..... | 141 |
| Figure 115 Approche Pareto (61)..... | 144 |
| Figure 116 Echantillonnage et maillage de l'espace de décision employé pour l'interpolation linéaire | 145 |
| Figure 117 Représentation 3D de $g_1(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues } (f, \gamma, \text{ fond Sombre})$ | 149 |
| Figure 118 Représentation 3D de $g_2(f, \gamma) = \% \text{ variations perçues } (f, \gamma, \text{ fond Blanc})$ – Les points représentent les pourcentages bruts perçus par expérience..... | 149 |
| Figure 119 Réglages de l'algorithme génétique..... | 150 |
| Figure 120 Exemple du tableau type pour recueillir les informations après calcul d'optimisation..... | 151 |
| Figure 121 Solutions Pareto optimales de perception du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de l'environnement..... | 151 |
| Figure 122 Valeurs obtenues pour le couple [70,0601Hz ; 49,8409 %] pour 0% de perception..... | 152 |
| Figure 123 Valeurs obtenues pour le couple [57,5533 Hz ; 20%] pour 50% de perception..... | 152 |
| Figure 124 Solutions Pareto-optimales filtrées..... | 154 |
| Figure 125 Confort visuel du papillotement de la lumière quelle que soit la couleur de l'environnement et solutions Pareto-optimales de confort - PO TI= couple de solutions Pareto-Optimales Très Inconfortable - PO I= couple de solutions Pareto-Optimales Inconfortable - PO C= couple de solutions Pareto-Optimales Confortable - PO TC = couple de solutions Pareto-Optimales Très Confortable | 156 |
| Figure 126 Réglages de l'algorithme génétique..... | 158 |
| Figure 127 Optimisation présentant le pourcentage de perception du papillotement de la lumière sur fond sombre (0%, 5%, 20%, 50%) pour différents angles de perception..... | 159 |
| Figure 128 Optimisation présentant le pourcentage de perception du papillotement de la lumière sur fond blanc (0%, 5%, 20%, 50%) pour différents angles de perception..... | 159 |
| Figure 129 Solutions Pareto-optimales quel que soit l'axe de perception visuelle et la couleur de l'environnement (fond sombre et blanc)..... | 160 |
| Figure 130 Ecarts et performance de perception du papillotement de lumière pour le couple [59,6365 ; 43,2291] pour 5% de perception..... | 161 |
| Figure 131 Ecarts et performance de perception du papillotement de lumière pour le couple [59,8774 ; 43,4021] pour 50% de perception..... | 162 |

| | |
|--|-----|
| Figure 132 Solutions Pareto- optimales filtrées quel que soit l'axe d'orientation et la couleur de fond (sombre ou blanc) | 163 |
| Figure 133 Confort visuel du papillotement de la lumière quel que soit l'axe de perception visuel et la couleur de l'environnement (fond sombre et fond blanc) et solutions Pareto-optimales de confort - PO TI= couple de solutions Pareto-Optimales Très Inconfortable - PO I= couple de solutions Pareto-Optimales Inconfortable - PO C= couple de solutions Pareto-Optimales Confortable - PO TC = couple de solutions Pareto-Optimales Très Confortable | 164 |
| Figure 134 Résultats principaux 1ère expérience | 166 |
| Figure 135 Résultats principaux 2nde expérience | 166 |
| Figure 136 Brillance ressentie du flash de notre expérience reporté sur le graphique empirique présentant la brillance apparente (ou ressentie) de flashes avec des luminances variables et fonction de la durée du flash. Effet Broca et Sulzer (60)..... | 167 |
| Figure 137 Résultats Fond sombre – Comparaison à 120 lx..... | 169 |
| Figure 138 Résultats Fond sombre – Comparaison à 500 lx..... | 169 |
| Figure 139 Résultats Fond blanc – Comparaison à 120 lx..... | 170 |
| Figure 140 Résultats Fond blanc – Comparaison à 500 lx..... | 170 |
| Figure 141 Résultats Fond rouge – Comparaison à 120 lx..... | 171 |
| Figure 142 Résultats Fond rouge – Comparaison à 500 lx..... | 171 |
| Figure 143 Résultats Fond vert – Comparaison à 120 lx | 172 |
| Figure 144 Résultats Fond vert – Comparaison à 500 lx | 172 |
| Figure 145 Résultats Fond bleu – Comparaison à 120 lx..... | 173 |
| Figure 146 Résultats Fond bleu – Comparaison à 500 lx..... | 173 |
| Figure 147 Graphique théorique des réponses suite aux comparaisons de niveaux d'éclairement | 174 |
| Figure 148 Erreurs de jugement selon les niveaux d'éclairement de référence et leurs intervalles de variation | 174 |
| Figure 149 Illustration des grandeurs en éclairage (63) | 177 |
| Figure 150 Dispositif expérimental | 179 |
| Figure 151 LED utilisée dans l'expérience..... | 179 |
| Figure 152 Recommandations pour l'éclairage des musées | 181 |
| Figure 153 Régulation de puissance pour une commande de courant à 25 %..... | 182 |
| Figure 154 : a) Commande de courant en mode continu sur 1000 heures b) Commande de courant en mode pulsé sur 1000 heures | 183 |
| Figure 155 Comparaison de la variation d'éclairement sur 1000 heures..... | 184 |
| Figure 156 Comparaison de la variation de la température de couleur sur 1000 heures..... | 184 |
| Figure 157 Points colorimétriques pour la laine bleue sur 1000 heures a) en Mode Continu b) en Mode Pulsé, dans un graphique CIE..... | 185 |
| Figure 158 Mesures avec le spectro-colorimètre RUBY, Conditions: D65 and CIE 31 | 186 |
| Figure 159 Point colorimétrique pour tous les échantillons sur 1000 heures a) en Mode Continu b) en Mode Pulsé, dans le graphique CIE. | 187 |
| Figure 160 Températures de couleur de sources de lumières artificielle usuelles et du soleil | 212 |
| Figure 161 La figure de gauche représente la répartition des voies optiques. Les voies correspondant à la moitié droite du champ visuel (traits bleus en pointillés) se rendent à l'hémisphère gauche et inversement (traits bleus continus). Les schémas de droite montrent les zones obscurcies des champs visuels à la suite des sections 1, 2, 3 et 4. (12 p. 116) | 214 |

| | |
|---|-----|
| Figure 162 voies optiques vues de profil et de dessus (80) | 214 |
| Figure 163 Détail du traitement des informations visuelle par voie rétino-géniculo-striée | 215 |
| Figure 164 Organisation des voies M, P et K issues de la rétine et allant vers le corps genouillé latéral (81)..... | 216 |
| Figure 165 Spécialisation fonctionnelle des voies M, P et K (81)..... | 217 |
| Figure 166 Localisation du noyau suprachiasmique (SNC) (82)..... | 218 |
| Figure 167 Place du système nerveux périphérique (SNP) (83) | 219 |
| Figure 168 Aires de projection dans le cortex cérébral : le thalamus et le mésencéphale (mes. sur le graphique) | 220 |
| Figure 169 Vue de dessus du cerveau et son système nerveux périphérique (83) | 221 |
| Figure 170 Transmission des UV dans un œil humain emmétrope, jusqu'à 9 ans (18)..... | 222 |
| Figure 171 Transmission des UV dans un œil humain emmétrope, à partir de 10 ans (18) | 223 |
| Figure 172 Transmission des UV dans un œil humain emmétrope, âgé entre 60 et 70 ans (18)..... | 223 |
| Figure 173 Réaction biochimiques induites par photo-isomérisation d'un bâtonnet..... | 229 |
| Figure 174 Schéma d'optique géométrique-formation d'image avec 1 dioptre sphérique (85)..... | 230 |
| Figure 175 Schéma d'optique géométrique- formation d'image avec lentille mince (85) | 231 |
| Figure 176 Schéma optique détaillé - formation d'image avec lentille mince - Les points cardinaux (85)..... | 231 |
| Figure 177 Optique géométrique -Schéma de l'œil par Bennett et Rabbett (3 ^{ème} Ed. p 210.) (85). | 232 |
| Figure 178 Optique géométrique - Axes de l'œil (85)..... | 232 |
| Figure 179 Optique géométrique - Erreur de formation de l'image en amont ou aval de la rétine selon l'ouverture de la pupille (85) | 233 |
| Figure 180 Impact de l'ouverture pupillaire sur la netteté des images reçue (85) | 233 |
| Figure 181 Diffraction de Fraunhofer - De gauche à droite : Ouverture circulaire (pupille), tâche d'Airy (front d'onde sur plan focal image) (Courbe d'intensité et vue sur plan focal image), représentation de la diffraction dans le plan focal image de l'œil (rétine) (85) | 234 |
| Figure 182 Front d'onde pour différentes ouverture pupillaires (en mm) - Œil humain parfait (85) | 234 |
| Figure 183 Diffusion volumétrique dans le cristallin pour modélisation d'un œil atteint de cataracte (86)..... | 235 |
| Figure 184 Eblouissement (86)..... | 235 |
| Figure 185 Lumière et éblouissement dans l'œil (87)..... | 235 |
| Figure 187 A gauche : Aberration chromatique axiale d'un œil sain; A droite : Aberration chromatique latérale (87)..... | 236 |
| Figure 186 A gauche : diagramme de diffraction ; A droite : couronne ciliaire (éblouissement) (87) | 236 |
| Figure 188 Différence chromatique de grossissement (87)..... | 237 |
| Figure 189 Aberration sphérique d'une lentille produisant a) des images à des distances différentes, b) différentes longueurs focales. Ceci dépendant de l'ouverture de la lentille (h rayon d'ouverture) (87)..... | 238 |
| Figure 190 a) image sans distorsion : grille carrée - b) distorsion de l'image die « coussin » et C) « baril », dues à des grossissements non uniformes d'aberrations sphérique. (87) | 238 |
| Figure 191 Fonction d'étalement de point : diffraction obtenue à différentes ouvertures pupillaires pour un œil parfait théorique et œil réel sain. (87) | 239 |

| | |
|--|-----|
| Figure 192 Décomposition d'un front d'onde..... | 240 |
| Figure 193 Fonctions élémentaires (90) | 241 |
| Figure 194 Perception d'une mire (90)..... | 242 |
| Figure 195 Temps d'adaptation à l'obscurité des photorécepteurs visuels en fonction de l'âge. Ronds blancs : cônes / ronds noirs bâtonnets (92) | 243 |
| Figure 196 a) Représentation du spectre coloré de la lumière blanche, et b) de celui d'un individu atteint de daltonisme du vert (deutéranopie). (97)..... | 250 |
| Figure 197 différents types de déficiences à la couleur (97) | 251 |
| Figure 198 vision des couleurs selon le type de daltonisme (97)..... | 252 |
| Figure 199 Evolution de la maladie d'Alzheimer (D'après Feldman et Gracon, 1996) (101) | 255 |
| Figure 200 Pourcentage de patients avec épilepsie photosensible montrant des réponses par électro-encéphalographie (EEG) pour un papillotement de la lumière issu d'une lampe à décharge à xénon ; en abscisse : fréquence des flashes, en ordonnée : pourcentage de réponse (Harding and Jeavons, 1994). (8) | 257 |
| Figure 201 Courbe de Kruithoff : éclairement (lux) en fonction de la température de couleur (K) (106) | 263 |

A

Asthénopie : faiblesses oculaires, accompagnée de céphalées (maux de tête) et d'une baisse de l'acuité visuelle.

C

Canal hyaloïde : cicatrice embryologique de l'artère hyaloïde.

Choroïde : couche pleine de pigments qui constitue une chambre noire ; elle est très vascularisée.

Cornée : C'est une membrane transparente. Elle est le prolongement plus bombé de la sclérotique. La frontière sclérotique-cornée s'appelle le limbe. La cornée est très innervée donc très sensible. Elle est transparente et doit le rester pour pouvoir assurer une bonne vision.

Corps ciliaire : c'est un muscle qui permet de modifier la courbure du cristallin lors de l'accommodation.

Couleurs primaires : couleurs par définition pures ou fondamentales.

Couleurs binaires : obtenues par le mélange de 2 couleurs primaires.

Cristallin : c'est une lentille transparente biconvexe vascularisée qui constitue l'objectif de l'œil. Sa courbure peut varier, d'où une variation de sa puissance phénomène communément appelé: "accommodation". Si le cristallin se bombe, il augmente sa puissance (dioptrie).

E

Eclairement : Quantité de flux lumineux éclairant une surface (il est indépendant de la nature de celle-ci). Exprimée en lumen par m² ou lux (lx).

Eclairement rétinien : L'éclairement rétinien est défini en lux. Il correspond à la quantité de lumière parvenant sur les photorécepteurs rétiniens. Il va diminuer avec le diamètre de la pupille.

Ergorama : correspond à la portion centrale du champ visuel avec 30° d'ouverture, nécessaire à une tâche visuelle.

F

Fovéa : région de la rétine située dans la macula, près de l'axe optique de l'œil, dans la partie centrale de cette dernière. Cette région est de la plus haute importance pour la vision. C'est elle qui donne la vision la plus précise, en éclairage diurne, car c'est la zone où la majorité de cônes se trouvent.

Flux lumineux : puissance lumineuse émise par une lampe dans tout l'espace. Exprimée en lumens (lm).

G

Gestalt : psychothérapie qui résout les troubles émotionnels et comportementaux par un travail sur les processus psychologiques et corporels de l'individu.

H

Humeur aqueuse : c'est un liquide transparent filtré et renouvelé en permanence. Avec l'humeur vitrée, elle est responsable du maintien de la pression intraoculaire et donc la forme du globe oculaire.

Humeur ou corps vitrée : tissu conjonctif gélatineux et transparent capable d'amortir les chocs. Il représente 90% du volume de l'œil et est formé de 90% d'eau. Avec l'humeur aqueuse, il aide au maintien de la rigidité du globe oculaire, notamment la rétine au fond du globe de l'œil. Il intervient également dans le maintien de la pression intraoculaire et lui permet d'absorber les pressions auxquelles il est soumis sans altérer la vision. Dans la partie ventrale du corps vitré est présente le canal hyaloïde.

I

Illuminant : rayonnement dont la répartition spectrale d'énergie est définie dans le domaine des longueurs d'onde capables d'influencer la perception des couleurs.

Intensité lumineuse : quantité de flux lumineux émise dans une direction par unité d'angle solide pour une source ponctuelle. Exprimé en candela (cd). Elle permet de caractériser les luminaires en indiquant sur un graphe leur intensité lumineuse dans les différentes directions (pour une source lumineuse de 1 000 lm).

Indice de rendu des couleurs (IRC ou Ra) : c'est un indice, dont la valeur est comprise entre 0 et 100, qui définit la capacité d'une source à restituer correctement les différentes couleurs de ce qu'elle éclaire sans en modifier les teintes, et ceci par rapport à une source de référence. On définit des classes d'IRC en fonction de la plage d'IRC et un bon rendu des couleurs peut compenser la baisse du niveau d'éclairage. Dans la plupart de cas, cinq points de variation d'IRC sont perceptibles par notre œil humain

A titre indicatif :

- IRC du soleil = 100, très bon rendu de couleur ;
- IRC lampe à vapeur de sodium basse pression = 25, mauvais rendu de couleur ;
- Il est recommandé, dans les magasins, locaux scolaires ou bureaux, que l'IRC soit supérieur à 80 pour avoir un bon rendu de couleur.

Iris : C'est une membrane pigmentée. Il correspond à la partie anatomique de l'œil qui est responsable de la régulation de la dilatation de la pupille. Les pigments qu'il contient déterminent à eux seuls la couleur de l'œil. C'est un diaphragme circulaire se réglant automatiquement suivant la quantité de lumière reçue. En pleine lumière, l'iris se ferme, et dans l'obscurité, il s'ouvre.

L

Luminance : quantifie la lumière émise par une source étendue, par unité de surface. Elle définit la lumière perçue directe ou indirecte perçue par un observateur. Exprimé en candela par mètre carré (cd/m^2)

M

Macula : projection de l'axe optique sur la rétine. Cela ressemble à une tâche jaune qui apparaît au centre du pôle postérieur comme une fine excavation. Dans cette zone elliptique centrale (3 mm dans le grand axe et 2 mm dans le petit axe) se trouve le maximum de cônes. Cette zone permet donc une vision très précise.

Métamérisme : il s'agit de l'obtention d'une même impression colorée à partir de deux distributions spectrales différentes.

Muscles oculomoteurs : muscles situés sur la partie externe de l'œil. Ils relient le globe oculaire à son orbite et permettent aussi le mouvement de l'œil (six degrés de liberté) :

- mouvement haut/bas (x2) ;
- mouvement droite/gauche (x2) ;
- mouvement de rotation (x2).

N

Nerf optique : lieu où se rejoignent toutes les fibres nerveuses pour former un câble appelé le nerf optique. Il mesure 4 mm de diamètre et 5 cm de long. Il y a un nerf optique par œil, donc deux nerfs optiques en tout. Ces deux nerfs se croisent dans une zone appelée chiasma optique. Via la rétine, le nerf optique reçoit l'information lumineuse, et va permettre de transférer l'image de la rétine au cerveau.

P

Panorama : correspond à un champ visuel compris entre 30° d'ouverture et 60° ou 70°.

Papille : La papille est une zone circulaire de l'œil correspondant à la naissance du nerf optique. Elle se situe sur la rétine, à l'endroit où se réunissent les fibres optiques provenant des cellules ganglionnaires nerveuses de la rétine. La papille mesure environ 1,5 mm de diamètre, elle est plus pâle que le reste de la rétine et apparaît légèrement en relief, surtout sur la zone orientée vers le nez

Phorie : axe visuel au repos d'un œil fixant un objet en vision binoculaire.

Phosphène : phénomène qui se traduit par la sensation de voir une lumière ou par l'apparition de taches dans le champ visuel. Les phosphènes peuvent être causés par une stimulation mécanique, électrique, ou magnétique de la rétine ou du cortex visuel mais aussi par une destruction de cellules dans le système visuel. Dans certains cas, ce phénomène optique est dû à la persistance rétinienne. Il survient normalement après fixation d'une source lumineuse ponctuelle. Lorsque ce phénomène bien connu aveugle momentanément, on parle d'éblouissement (au volant par exemple). Les phosphènes peuvent être aussi un signe précurseur d'un décollement de rétine. Ils peuvent encore intervenir lors de troubles neurologiques, comme l'épilepsie ou la migraine ophtalmique, ou suite à la prise d'un psychotrope (médicament ou drogue de type hallucinogène). Les phosphènes peuvent accompagner les vertiges orthostatiques qui se produisent lorsque la personne passe de la position allongée ou assise, à la position debout trop rapidement. C'est, en général, le signe d'une tension artérielle trop faible ou d'un traitement hypotenseur mal adapté.

Photorécepteurs visuels : les cônes et bâtonnets. Ce sont des cellules photoréceptrices qui contiennent des molécules de pigments photosensibles. Ensemble, elles participent à la vision des détails, des lumières, des couleurs, des formes et des mouvements. Plus spécifiquement, les cônes, localisés dans la fovéa, permettent la vision diurne et vision des couleurs. Ils sont au nombre de 5 millions, et il existe trois types de cônes. Les bâtonnets, localisés en périphérie de la rétine, permettent la vision en noir et blanc, et sont adaptés à de faibles lumières (vision scotopique). Ils sont au nombre de 125 millions, et il n'existe qu'un seul type de bâtonnets.

Pupille : c'est le trou situé au milieu de l'iris. Sa taille, qui varie en fonction de la quantité de lumière lui parvenant, est contrôlée par des mouvements de contraction (myosis) et de détente (mydriase) du muscle de l'iris. Ces mouvements constituent le réflexe pupillaire qui permet de réguler l'intensité de lumière entrant dans l'œil. Son diamètre peut aller d'environ 1 à 8 mm.

R

Rétine : c'est une membrane nerveuse (ou tissu sensoriel) qui tapisse le fond de l'œil. Elle est très importante mais aussi très fragile puisqu'elle n'est épaisse que d'environ 0,5 mm, et que sa surface est voisine de celle d'un timbre-poste. Elle est constituée de plus de 130 millions de cellules nerveuses (125 millions de bâtonnets et 5 millions de cônes). La lumière qui pénètre dans l'œil doit traverser plusieurs

couches de cellules nerveuses régulièrement disposés avant d'atteindre la couche sensible des cônes et des bâtonnets. La rétine a pour rôle de transformer un flux lumineux en signaux électriques qui seront acheminés par le nerf optique vers le cerveau via des impulsions (influx nerveux). Remarquons que chez les vertébrés, la rétine est inversée par rapport à la direction des rayons lumineux. C'est pour cela que la lumière doit traverser l'épaisseur de la rétine pour parvenir aux segments externes des photorécepteurs.

S

Sclérotique (Sclère): c'est une membrane rigide, opaque qui constitue l'enveloppe de l'œil. Sa partie antérieure constitue la cornée. La sclérotique est visible de l'extérieur, elle constitue le "blanc de l'œil". Elle est entourée d'une membrane très fine et transparente, appelée conjonctive. Elle donne insertion aux muscles mobilisateurs du globe. Elle est perforée en arrière pour laisser le passage au nerf optique par le canal intra scléral et par des perforations accessoires qui donnent passage aux vaisseaux et aux nerfs.

T

Temperature de couleur : elle caractérise la couleur apparente de la lumière. Elle correspond à la température du corps noir qui donne la même impression colorée.

Elle s'exprime en Kelvin (K).

La couleur apparente de la source a des effets psychologiques agréables ou désagréables. Elle a un impact sur le taux de mélatonine (hormone du sommeil) qui incitera au travail ou au repos.

On définit :

- Blanc chaud : (rougeâtre) < 3 500 K
- Blanc neutre : compris entre 3500K et 5000 K
- Blanc froid : (bleuté) > 5 000 K

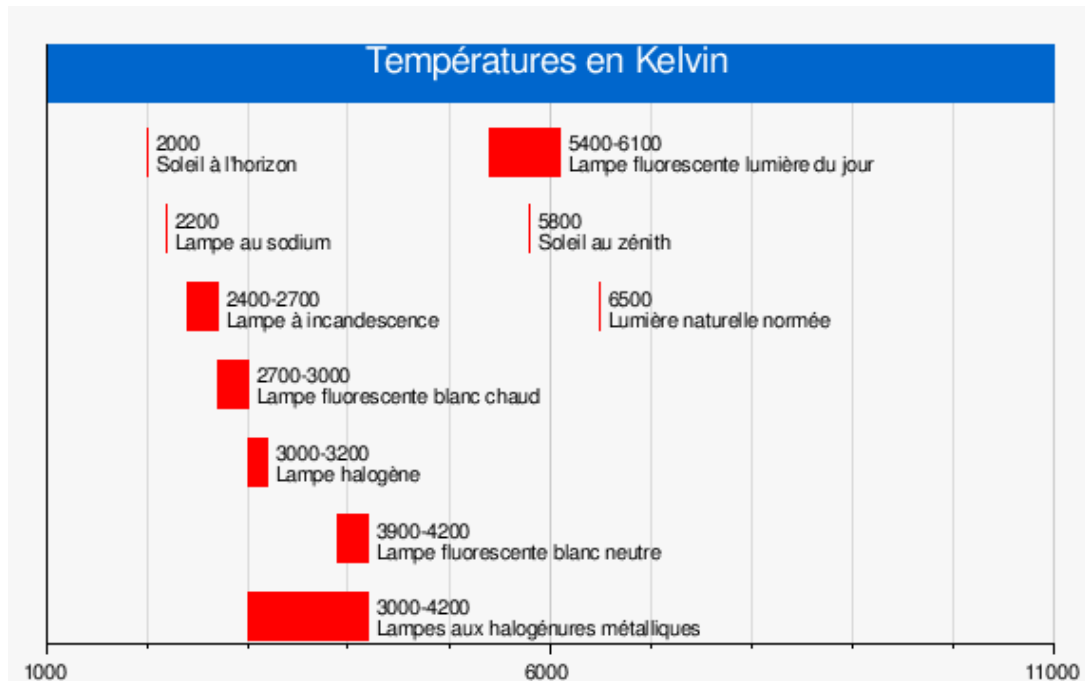


Figure 161 Températures de couleur de sources de lumières artificielle usuelles et du soleil

Troland : Unité de l'éclairement rétinien

Tuniques : L'œil est formé d'une coque oculaire, c'est-à-dire d'une enveloppe externe qui se compose elle-même de trois tuniques qui sont de l'extérieur vers l'intérieur de l'œil : la membrane de protection constituée par la sclérotique + l'uvée qui constitue la deuxième membrane qui va permettre de nourrir l'œil + la rétine.

U

Uvée : Iris + corps ciliaire + choroïde

Z

Zonule de Zinn : c'est un ligament qui lie le cristallin au corps ciliaire. Il maintient donc le cristallin et rend possible les changements de forme et d'épaisseur du cristallin pour permettre l'accommodation.

ANNEXES

| | |
|---|-----|
| ANNEXE 1 Les voies optiques..... | 214 |
| ANNEXE 2 Le système nerveux lié à la vision..... | 219 |
| ANNEXE 3 Interaction de la lumière visible dans l'œil humain en fonction de l'âge | 222 |
| ANNEXE 4 Contrastes spatiaux de luminance ou contrastes de luminances de Weber-Fechner C_w | 224 |
| ANNEXE 5 Cycle de réactions biochimiques induites par photo-isomérisation | 229 |
| ANNEXE 6 Outils d'optique pour modélisation de l'œil humain | 230 |
| ANNEXE 7 Impact de l'âge sur le temps d'adaptation à l'obscurité | 243 |
| ANNEXE 8 Troubles visuels | 245 |
| ANNEXE 9 Epilepsie photosensible | 256 |
| ANNEXE 10 Effets du papillotement de lumière..... | 259 |
| ANNEXE 11 Questionnaire | 261 |
| ANNEXE 12 Eclairage et température de couleur : Kruthoff..... | 263 |

ANNEXE 1 Les voies optiques

1. Répartition des voies optiques

La Figure 162 et la Figure 163 illustrent la répartition des voies optiques de l'œil vers le cerveau et vont nous servir tout le long de cette section.

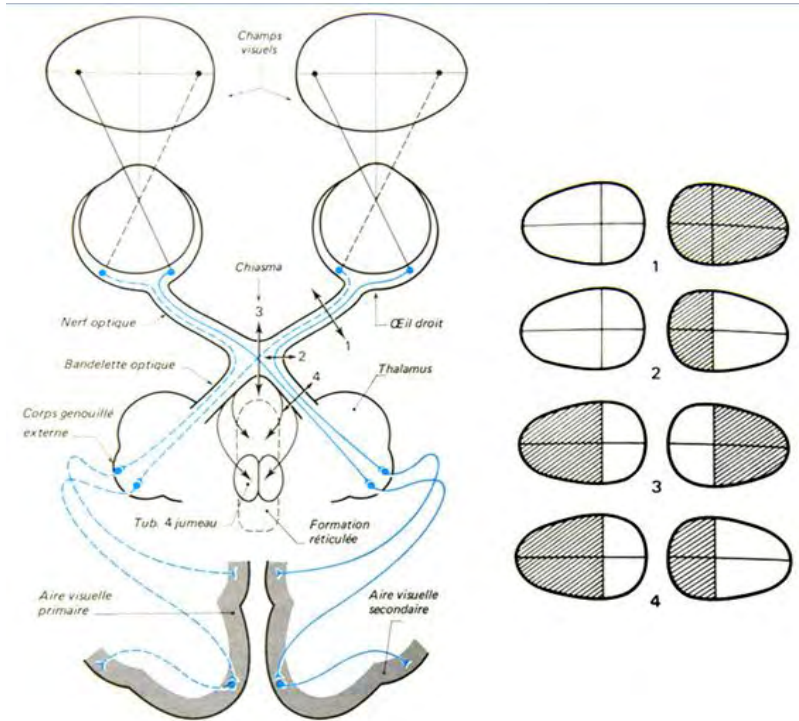


Figure 162 La figure de gauche représente la répartition des voies optiques. Les voies correspondant à la moitié droite du champ visuel (traits bleus en pointillés) se rendent à l'hémisphère gauche et inversement (traits bleus continus). Les schémas de droite montrent les zones obscurcies des champs visuels à la suite des sections 1, 2, 3 et 4. (12 p. 116)

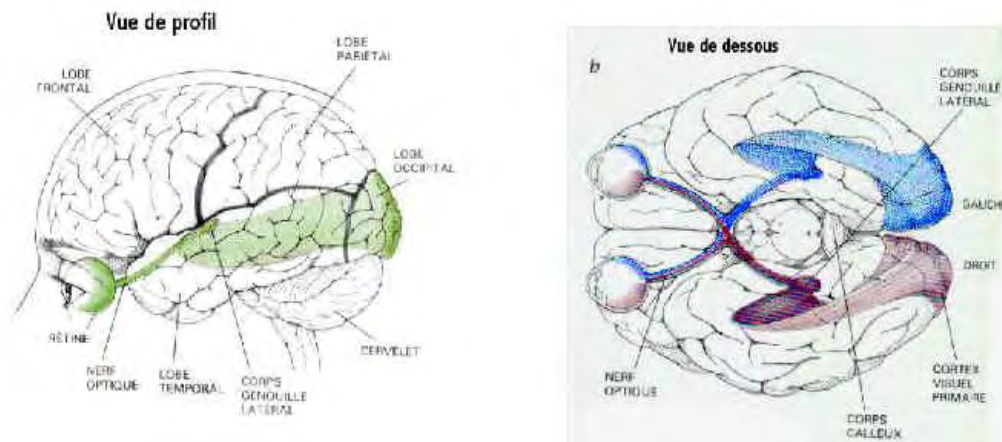


Figure 163 voies optiques vues de profil et de dessus (80)

Le nerf optique de chaque œil est constitué de fibres nerveuses qui sont les axones des cellules ganglionnaires de la rétine. Il est le lien transmettant l'influx d'informations reçus par l'œil vers le cerveau. Si les deux nerfs optiques sont sectionnés, il y aura cécité complète et irrémédiable de la vision. La Figure 162 présente différents cas de section de nerfs et l'impact sur la vision.

Le chiasma est la zone intermédiaire entre le nerf optique et le cerveau. Il s'agit d'une sorte de croisement partiel des fibres issues des hémirétines nasales et de la circulation latérales de fibres issues des hémirétines temporales. «Au-delà du chiasma, les axones des cellules ganglionnaires forment le tractus optique ou bandelette optique qui, contrairement au nerf optique, contient des fibres provenant des deux yeux.» (81) Ainsi, on retrouve 60% de fibres issues de l'hémirétine nasale et 40 % de fibres issues de l'hémirétine temporale.

Les « deux bandelettes optiques » ou voies de projection au niveau du cerveau sont inégalement réparties. Il existe :

- la voie rétino- géniculo-striée
- la voie mésencéphalique
- ainsi qu'une 3ème voie mais plutôt associée à la chronobiologie.

2. Voie rétino-géniculo-striée ou voie visuelle primaire

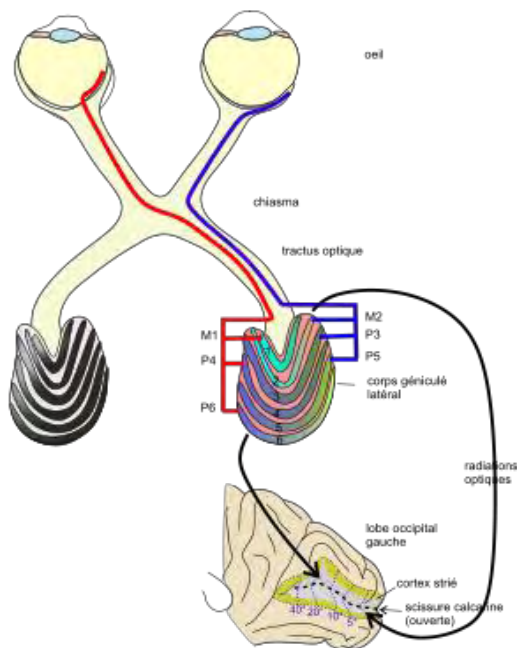


Figure 164 Détail du traitement des informations visuelle par voie rétino-géniculo-striée

La voie rétino-géniculo-striée, correspond à la voie visuelle issue des fibres des bandelettes optiques vers le corps genouillé externe du thalamus et qui après traitement ordonné des informations aboutissent par radiations optiques vers l'aire du cortex visuel opposé de l'œil. Cette voie permet l'élaboration d'une image regardée, en conservant la géolocalisation. C'est la voie de la conscience visuelle. (80)

Le corps genouillé externe (Figure 164) est aussi appelé corps géniculé latéral ou externe. Il en existe deux, de part et d'autre du mésencéphale. Il est constitué de six couches dont les propriétés d'afférences des fibres optiques et d'afférences vers le cortex visuel primaire sont distinctes.

Les lettres devant les numérotations de couches correspondent aux types de neurones du corps genouillé :

- 10% de neurones de grande taille : « magnocellulaires » M, pour lesquels les cellules afférentes sont les cellules ganglionnaires (parasol) permettant de récupérer des informations de cônes Rouge Vert et Bleu ou bâtonnets (via cellules amacrines).
- 80 % de petits neurones : « parvocellulaires » P, recevant les cellules ganglionnaires naines de petites tailles pour les cônes Rouge et Vert.
- 10% de plus petits neurones : « koniocellulaires » K, dont les cellules afférentes sont les cellules ganglionnaires « bistratifiées » des cônes bleus.

La Figure 165 présente l'organisation cellulaire des cellules afférentes au corps genouillé latéral.

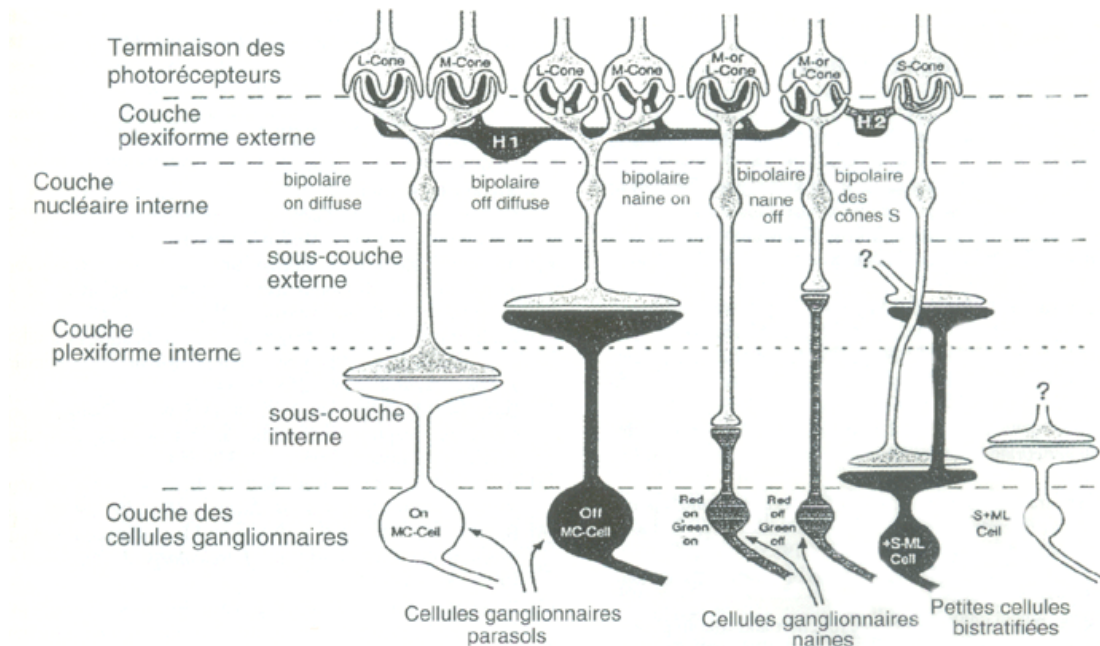


Figure 165 Organisation des voies M, P et K issues de la rétine et allant vers le corps genouillé latéral (81)

La fovéa est une zone très petite qui représente 1/4000 de la surface rétinienne, mais c'est aussi la zone la plus sensible qui occupe ainsi sur le territoire cortical plus de la moitié de la surface du centre.

Notons également que chaque cellule ganglionnaire de la fovéa ne reçoit l'information que d'un seul cône de la matrice des photorécepteurs, contrairement aux périphéries.

Chaque système M, P et K est spécialisé dans le transport d'un certain type d'informations, résumé dans le tableau ci-dessous :

| Tableau récapitulatif des trois systèmes M, P, K | Cellules afférentes provenant de la rétine et % | Couches du Corps Genouillé Latéral | Sensibilité physiologie | Fonction |
|--|---|------------------------------------|---|--|
| P parvosystème | Naines (X), bêta, B 80% | couches 3 à 6 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ petit champ récepteur ▪ bonne acuité ▪ sensible hautes fréquences spatiales et basses fréquences temporelles ▪ couleur ▪ lent (tonique) | assurera la vision des détails et des couleurs |
| M magnosystème | Parasols (Y), alpha, A 10% | couches 1 et 2 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ champ récepteur moyen ▪ acuité médiocre ▪ sensible basses fréquences spatiales et haute fréquences temporelles ▪ achromatique ▪ rapide (réponse phasique) | assurera la vision du mouvement et du PAPILLOTEMENT |
| K koniosystème | (W), gamma 10% | interlaminaire | <ul style="list-style-type: none"> ▪ grand champ récepteur ▪ couleur? ▪ réponses variées lent ou rapide | ? |

Figure 166 Spécialisation fonctionnelle des voies M, P et K (81)

3. Voie mésencéphalique

10% des fibres de la bandelette ne vont pas atteindre le corps genouillé. Ces fibres, qui majoritairement vont transmettre une information issue de la rétine périphérique, mais vont se diriger vers les tubercules quadrijumeaux antérieurs liés aux noyaux oculomoteurs des muscles oculaires. C'est là que s'élaborent les divers réflexes moteurs qui par leur rapidité permettent la capture des informations par la rétine centrale lors d'un événement intervenant dans le champ visuel: mouvement des globes oculaires, variations de courbure du cristallin, modification du diamètre de la pupille. » (12 p. 117) et (80)

4. 3ème Voie et hypothalamus

En plus de ces deux voies, il existe une troisième voie où un faible nombre de fibres nerveuses se dirigent vers les noyaux suprachiasmatiques (SNC) de l'hypothalamus. Elles permettent ainsi de donner une information lumineuse nécessaire au centre de la chronobiologie. (80)

En d'autres termes, ce sont les fibres nerveuses qui, via leur informations sur la lumière, permettent la mise en place de signaux hormonaux de synchronisation (mélatonine) nous permettant de contrôler des périodes et phases de rythmes biologiques : jour/nuit, et photopériode (jour long/ jour court)

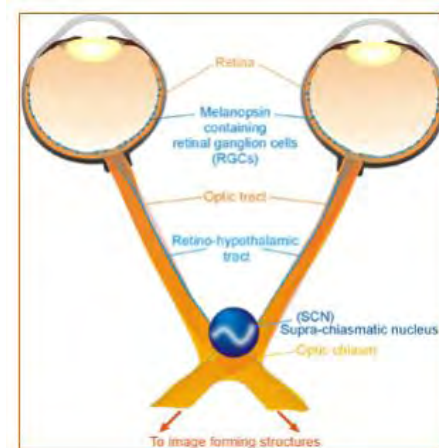


Figure 167 Localisation du noyau suprachiasmique (SNC) (82)

ANNEXE 2 Le système nerveux lié à la vision

Les nerfs vont donc transmettre des informations au système nerveux périphérique qui exécutera des décisions en acheminant les commandes motrices vers les effecteurs (les muscles effecteurs, les muscles lisses et les glandes).

La Figure 168 montre la place du système nerveux périphérique (SNP) (83)

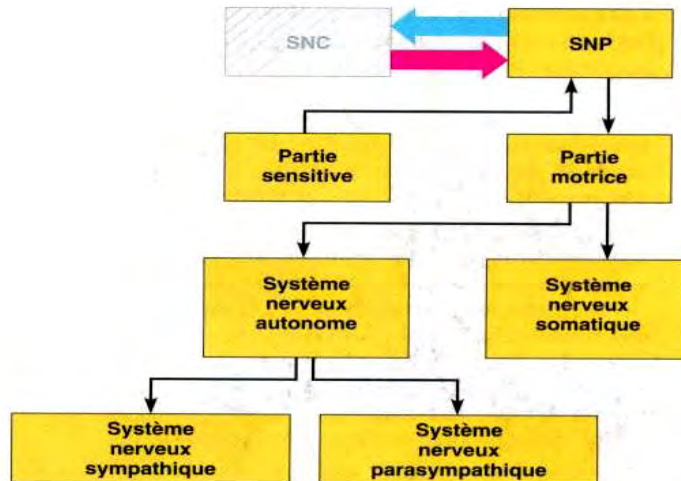


Figure 168 Place du système nerveux périphérique (SNP) (83)

Par définition le système nerveux périphérique comprend toutes les structures nerveuses autres que l'encéphale et la moelle épinière et comprend notamment les récepteurs sensoriels.

Nous concernant, il s'agira (83):

- des photorécepteurs de la rétine sensibles à l'énergie lumineuse si l'on considère une classification selon le type de stimulus ;
- ou des extérocepteurs si l'on considère une classification selon la localisation. Ils comprennent les récepteurs des sens : sensibilité aux stimuli de l'environnement et généralement situés à la surface du corps ;
- ou des récepteurs complexes si l'on considère une classification selon la complexité de structure. Cela comprend des organes de sens constitués d'amas de cellules de différents types participant à un même processus de réception, et associés à une sensibilité spécifique, dont la vue ;
- Notons que l'on peut aussi considérer les récepteurs simples qui sont situés dans la peau, les muqueuses, les muscles et les tissus conjonctifs.
On distinguera les récepteurs sensoriels simples à :
 - Terminaison libres (terminaison dendrique de neurones sensitifs) si l'on considère la cornée,
 - Terminaison capsulée si l'on considère la paupière.

Deux types de nerfs sont rattachés à l'œil : (83)

- Les nerfs optiques sont issus de neurofibres qui émergent de la rétine, et ils sont strictement sensitifs. Ce sont eux qui vont transmettre le signal de la rétine vers la région du cerveau correspondant à la vision, le thalamus ;
- Les nerfs oculo-moteurs qui émergent du mésencéphale. Ils sont dit mixtes c'est-à-dire à la fois sensitifs et moteurs, mais la dominante est motrice. Ces nerfs desservent quatre muscles de l'œil et permettent ainsi le mouvement :
 - de l'œil dans son orbite,
 - du muscle releveur de la paupière supérieure,
 - du muscle ciliaire,
 - du muscle sphincter de la pupille.

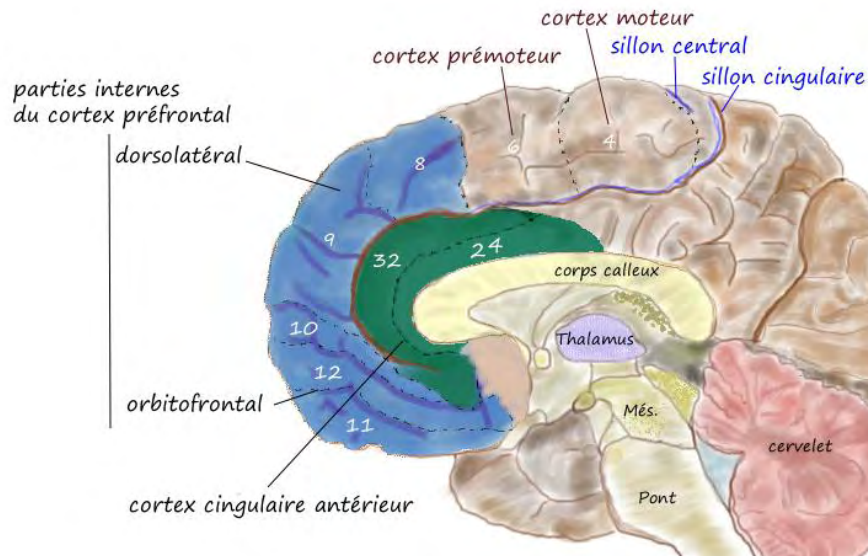
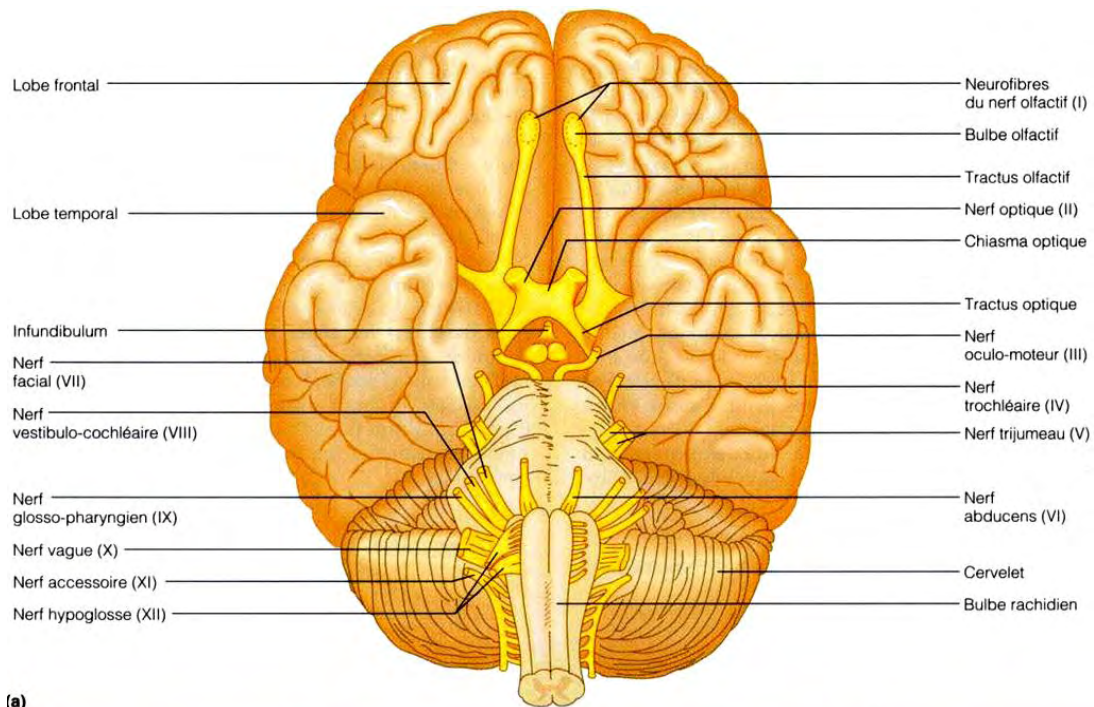


Figure 169 Aires de projection dans le cortex cérébral : le thalamus et le mésencéphale (mes. sur le graphique)



(a)

| Nerf crânien I – VI | Fonction sensorielle | Fonction motrice | Neurofibres parasymphatiques | Nerf crânien VII – XII | Fonction sensorielle | Fonction motrice | Neurofibres parasymphatiques |
|---------------------|---------------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|------------------------------|
| I Olfactif | Oui (odorat) | Non | Non | VII Facial | Oui (goût) | Oui | Oui |
| II Optique | Oui (vision) | Non | Non | VIII Vestibulo-cochléaire | Oui (ouïe et équilibre) | Non | Non |
| III Oculo-moteur | Non | Oui | Oui | IX Glosso-pharyngien | Oui (goût) | Oui | Oui |
| IV Trochléaire | Non | Oui | Non | X Vague | Oui (goût) | Oui | Oui |
| V Trijumeau | Oui (sensations tactiles) | Oui | Non | XI Accessoire | Non | Oui | Non |
| VI Abducens | Non | Oui | Non | XII Hypoglosse | Non | Oui | Non |

Figure 170 Vue de dessus du cerveau et son système nerveux périphérique (83)

ANNEXE 3 Interaction de la lumière visible dans l'œil humain en fonction de l'âge

Avec l'âge, la transmission des média optiques va se modifier qualitativement et quantitativement.

Voici ci-dessous les graphiques présentant l'absorption des rayons du visible pour un enfant âgé de moins de 9 ans, suivi de l'âge de 10 ans, et enfin de la tranche d'âge 60-70 ans, en considérant qu'entre 10 et 60 ans les paramètres de transmission de la lumière visible par les médias optiques vont se dégrader. (18)

Remarque : Les pigments de l'iris contiennent de la mélanine, qui absorbe l'intégralité de la lumière visible.

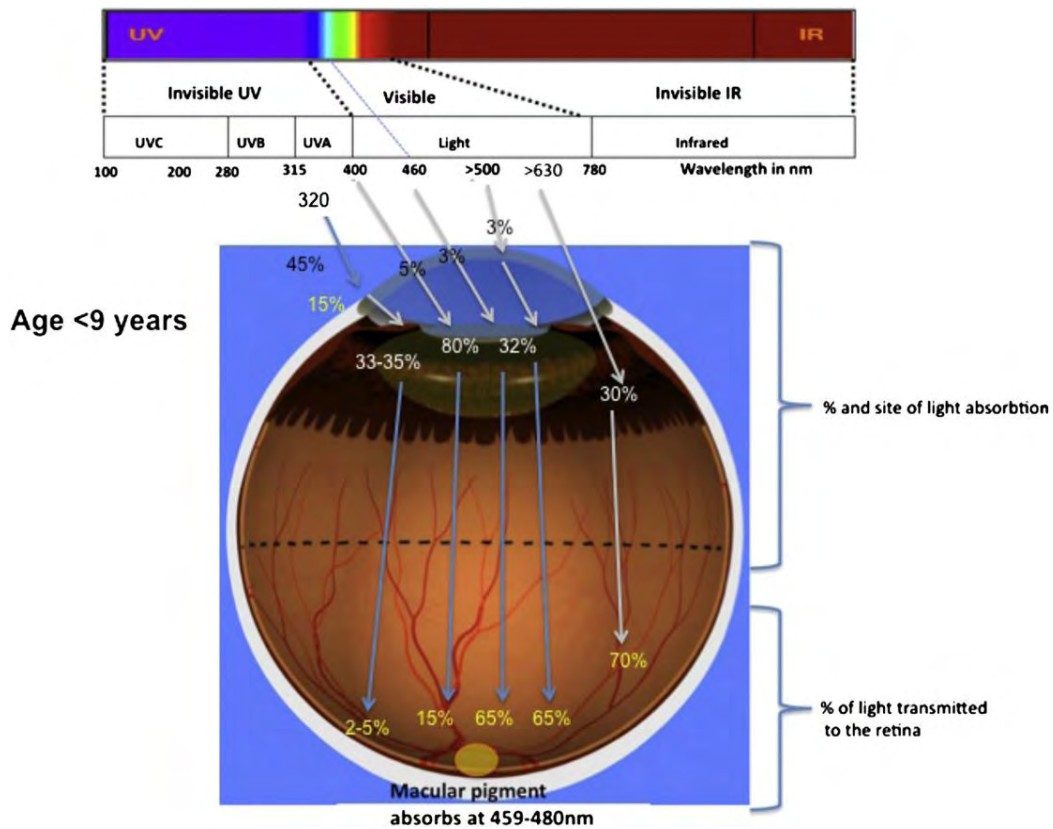


Figure 171 Transmission des UV dans un œil humain emmétrope, jusqu'à 9 ans (18)

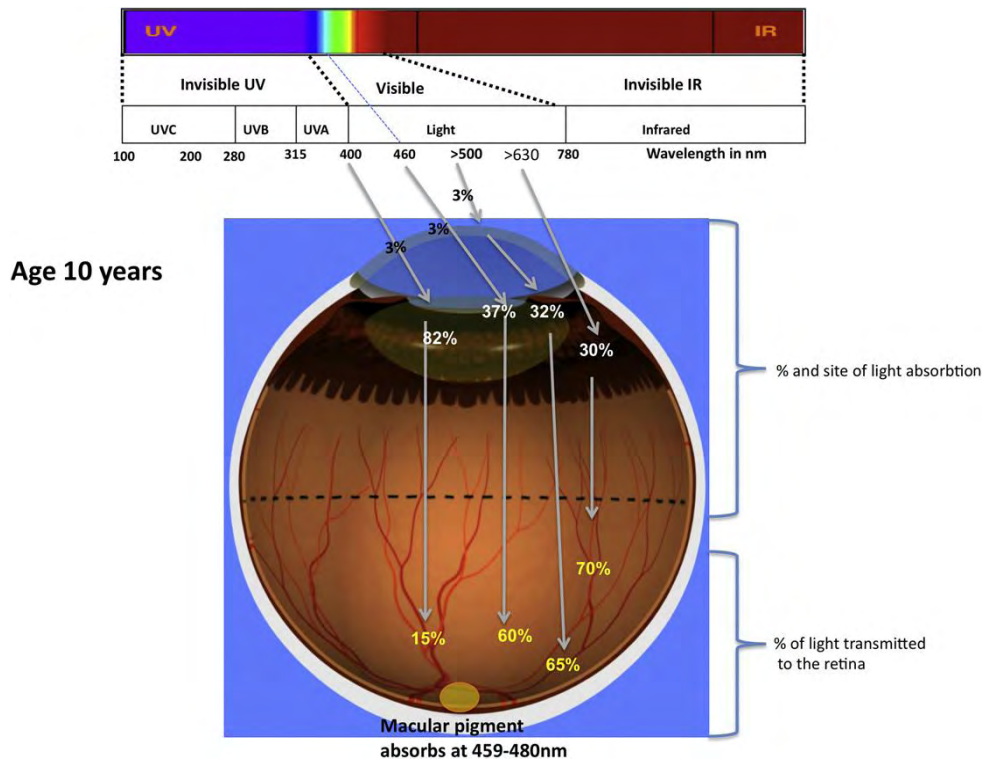


Figure 172 Transmission des UV dans un œil humain emmétrope, à partir de 10 ans (18)

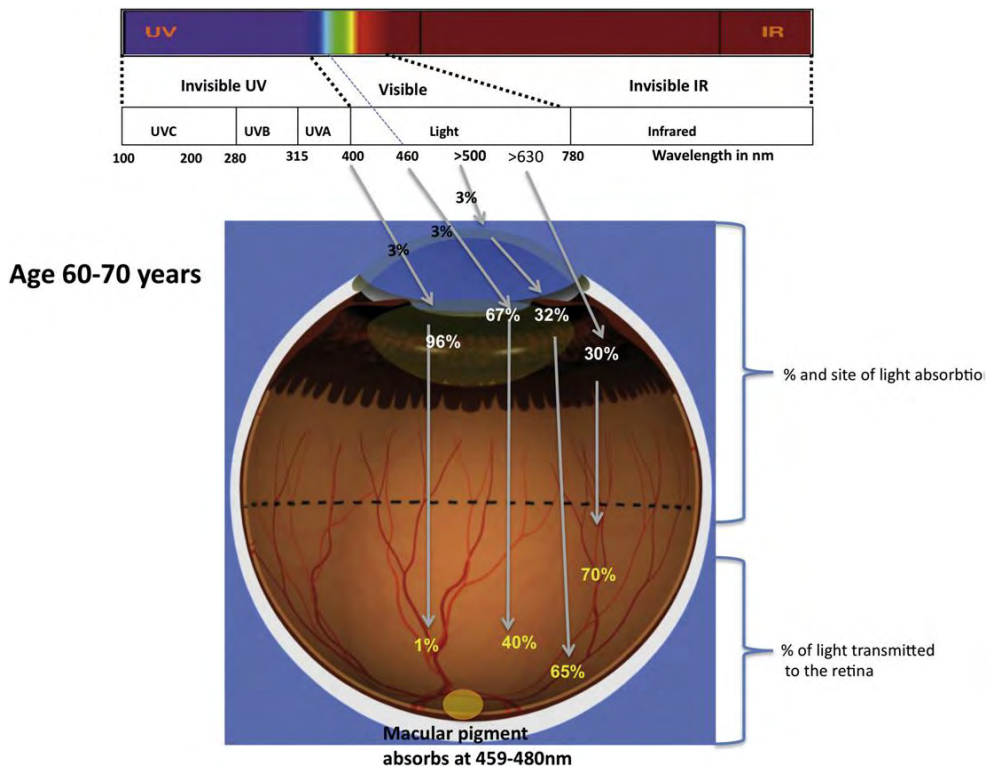


Figure 173 Transmission des UV dans un œil humain emmétrope, âgé entre 60 et 70 ans (18)

ANNEXE 4 Contrastes spatiaux de luminance ou contrastes de luminances de Weber-Fechner Cw.

1. Coefficient de réflexion d'une surface ρ surface

$$\rho \text{ surface} = \rho_s \text{ surface} + \rho_d \text{ surface}$$

ρ_s surface en [%] : coefficient de réflexion spéculaire de la surface étudiée
 ρ_d surface en [%] : coefficient de réflexion diffus de la surface étudiée

2. Coefficient de réflexion diffus d'une surface ρ_d

- Méthode 1 :

$$\rho_d \text{ surface} = \pi \cdot \frac{L_{\text{surface}}}{E_{\text{surface}}}$$

- Méthode 2 :

$$\rho_d \text{ surface} = \rho_d \text{ étalon} \cdot \frac{L_{\text{surface}}}{L_{\text{étalon}}}$$

ρ_d surface et ρ_d étalon en [%]
L surface et L étalon en [cd/m²]
E surface en [lux]

La méthode 2 est plus précise car ne fait intervenir que des valeurs du même ordre de grandeur (en l'occurrence la luminance) ce qui réduit les erreurs de mesures.

3. Coefficient de réflexion spéculaire d'une surface, ici un écran ρ_s écran

Ex : cas d'un écran d'ordinateur

$$\rho_s \text{ écran} = \frac{L_{\text{reflet}} + \left(\frac{\rho_d \text{ écran} \cdot E_{\text{écran}}}{\pi} \right)}{L_{\text{lampe}}} = \frac{L_{\text{reflet}} + L_{\text{surface}}}{L_{\text{lampe}}}$$

ρ_d étalon en [%]

L_{reflet} et L_{lampe} et L_{surface} en [cd/m^2]

$E_{\text{écran}}$ en [lux]

4. Contraste SANS luminance propre d'une tâche visuelle SANS réflexion spéculaire

On considère des matériaux uniquement diffusants dans le cas d'une tâche sans luminance propre.

Ex : travail sur papier, où le détail est constitué par les mots et le fond, la feuille de papier.

Le contraste propre du détail vu sur le fond est défini par :

$$C_w = \frac{L_D - L_F}{L_F} = \frac{\left(\frac{\rho_{\text{surface D}} \cdot E_{\text{surface}}}{\pi} \right) - \left(\frac{\rho_{\text{surface F}} \cdot E_{\text{surface}}}{\pi} \right)}{\frac{\rho_{\text{surface F}} \cdot E_{\text{surface}}}{\pi}} = \frac{\rho_{\text{surface D}} - \rho_{\text{surface F}}}{\rho_{\text{surface F}}}$$

C_w [sans unité] : contraste propre de Weber-Fechner

ρ_{surface} en [%] : coefficient de réflexion diffus de la surface étudiée

$\rho_{\text{surface D}}$ en [%] : coefficient de réflexion diffus du détail de la surface étudiée

$\rho_{\text{surface F}}$ en [%] : coefficient de réflexion diffus du fond de la surface étudiée

L_F en [cd/m^2] : luminance de fond

L_D en [cd/m^2] : luminance de détail

E en [lux]

On voit bien de part la formule que le contraste ne dépend que de la nature des matériaux, et ne varie pas avec l'éclairement.

5. Contraste AVEC luminance propre d'une tâche visuelle SANS réflexion spéculaire

Le contraste d'un écran d'ordinateur, qui a donc une luminance intrinsèque est défini par :

$$C_w = \frac{LD-LF}{LF} = \frac{\left(\frac{LDo + \frac{\rho_{\text{decran.Ecran}}}{\pi}}{Lfo + \frac{\rho_{\text{decran.Ecran}}}{\pi}}\right) - \left(\frac{LDo + \frac{\rho_{\text{decran.Ecran}}}{\pi}}{\pi}\right)}{\left(\frac{Lfo + \frac{\rho_{\text{decran.Ecran}}}{\pi}}{\pi}\right)} = \frac{(LDo+Lv) - (LDo+Lv)}{(Lfo+Lv)} = \frac{LDo-Lv}{Lfo+Lv}$$

En considérant la luminance de voile :

$$L_v = \frac{\rho_{\text{decran.Ecran}}}{\pi}$$

C_w [sans unité] : contraste de Weber-Fechner

ρ_{decran en} [%] : coefficient de réflexion diffus de la surface étudiée

L_{Fo} en [cd/m²] : luminance de Fond

L_{Do} en [cd/m²] : luminance de détail

E en [lux]

Ici, nous voyons bien que par contre, l'éclairement ne peut pas se simplifier dans la formule. Il impactera sur la valeur de la luminance de voile, correspondant aux réflexions diffuses sur l'écran, qui induit un éblouissement de voile.

6. Contraste SANS luminance propre d'une tâche visuelle AVEC réflexion spéculaire :

On considère des matériaux uniquement diffusants dans le cas d'une tâche sans luminance propre. Ex : travail sur papier qui a été placé dans une pochette plastique, où le détail est constitué par les mots et le fond, la feuille de papier, éclairé par une lampe.

Le contraste propre du détail vu sur le fond est défini par :

$$C_w = \frac{LD - LF}{LF} = \frac{\left(\frac{\rho_{\text{surface D. Esurface}}}{\pi} + \frac{L_{\text{refletD}} + L_{\text{surfaceD}}}{L_{\text{lampe}}}\right) - \left(\frac{\rho_{\text{surface F. Esurface}}}{\pi} + \frac{L_{\text{refletF}} + L_{\text{surfaceF}}}{L_{\text{lampe}}}\right)}{\left(\frac{\rho_{\text{surface F. Esurface}}}{\pi} + \frac{L_{\text{refletF}} + L_{\text{surfaceF}}}{L_{\text{lampe}}}\right)}$$

C_w [sans unité] : contraste propre de Weber-Fechner

ρ_{surface} en [%] : coefficient de réflexion diffus de la surface étudiée

ρ_{surfaceD} en [%] : coefficient de réflexion diffus du détail de la surface étudiée

pdsurfaceF en [%] : coefficient de réflexion diffus du fond de la surface étudiée
LF en [cd/m²] : luminance de fond
LD en [cd/m²] : luminance de détail
Lreflet D en [cd/m²] : luminance issue du reflet de la lampe et mesuré dans le détail
Lreflet F en [cd/m²] : luminance issue du reflet de la lampe et mesuré dans le fond
Llampe en [cd/m²] : luminance de la lampe en visée directe
E en [lux]

7. Contraste AVEC luminance propre d'une tâche visuelle AVEC réflexion spéculaire

On considère des matériaux uniquement diffusants dans le cas d'une tâche sans luminance propre. Ex : travail sur tablette graphique, où le détail est constitué par les mots et le fond de l'écran, éclairé par une lampe, et dont l'écran possède une luminance intrinsèque.

Le contraste propre du détail vu sur le fond est défini par :

$$\begin{aligned}
 C_w &= \frac{LD - LF}{LF} \\
 &= \\
 &= \frac{\left(LDo + \frac{\rho_{\text{decran}} \cdot E_{\text{ecran}}}{\pi} + \frac{L_{\text{refletD}} + L_{\text{surfaceD}}}{L_{\text{lampe}}} \right) - \left(LDo + \frac{\rho_{\text{decran}} \cdot E_{\text{ecran}}}{\pi} + \frac{L_{\text{refletF}} + L_{\text{surfaceF}}}{L_{\text{lampe}}} \right)}{\left(LFo + \frac{\rho_{\text{decran}} \cdot E_{\text{ecran}}}{\pi} + \frac{L_{\text{refletF}} + L_{\text{surfaceF}}}{L_{\text{lampe}}} \right)} \\
 &= \frac{\left(LDo + Lv + \frac{L_{\text{refletD}} + L_{\text{surfaceD}}}{L_{\text{lampe}}} \right) - \left(LDo + Lv + \frac{L_{\text{refletF}} + L_{\text{surfaceF}}}{L_{\text{lampe}}} \right)}{\left(LFo + Lv + \frac{L_{\text{refletF}} + L_{\text{surfaceF}}}{L_{\text{lampe}}} \right)}
 \end{aligned}$$

En considérant la luminance de voile : $Lv = \frac{\rho_{\text{decran}} \cdot E_{\text{ecran}}}{\pi}$

Cw [sans unité] : contraste propre de Weber-Fechner
pdsurface en [%] : coefficient de réflexion diffus de la surface étudiée
pdsurfaceD en [%] : coefficient de réflexion diffus du détail de la surface étudiée
pdsurfaceF en [%] : coefficient de réflexion diffus du fond de la surface étudiée
LF en [cd/m²] : luminance de fond

LD en $[\text{cd}/\text{m}^2]$: luminance de détail

Lreflet D en $[\text{cd}/\text{m}^2]$: luminance issue du reflet de la lampe et mesuré dans le détail

Lreflet F en $[\text{cd}/\text{m}^2]$: luminance issue du reflet de la lampe et mesuré dans le fond

Llampe en $[\text{cd}/\text{m}^2]$: luminance de la lampe en visée directe

E en [lux]

LFo en $[\text{cd}/\text{m}^2]$: luminance de fond

LDo en $[\text{cd}/\text{m}^2]$: luminance de détail

ANNEXE 5 Cycle de réactions biochimiques induites par photo-isomérisation

Il existe huit étapes pour le cycle de réactions biochimiques. Ce sont quasiment les même étapes pour les cônes et les bâtonnets (84).

1. Isomérisation du rétinol et hydrolyse de la liaison ester
2. Oxydation du rétinol et passage dans le segment externe
3. Fixation du 11-cis rétinol sur l'aporphodopsine par formation d'une imine
4. Capture du signal photonique, le 11-cis rétinène est isomérisé en tout-trans
5. Hydrolyse spontanée de l'imine, libération du rétinol
6. Réduction du rétinol et passage dans une cellule pigmentaire
7. Estérification du rétinol
8. Retour à l'étape 1

Remarque : Les étapes 1, 2 et 7 se déroulent dans les cellules de l'épithélium (EPR). Les étapes 3 à 6 ont lieu dans les segments extérieurs des cellules bâtonnets.

Figure 174 ci-dessous illustre ces étapes dans le cas d'un bâtonnet :

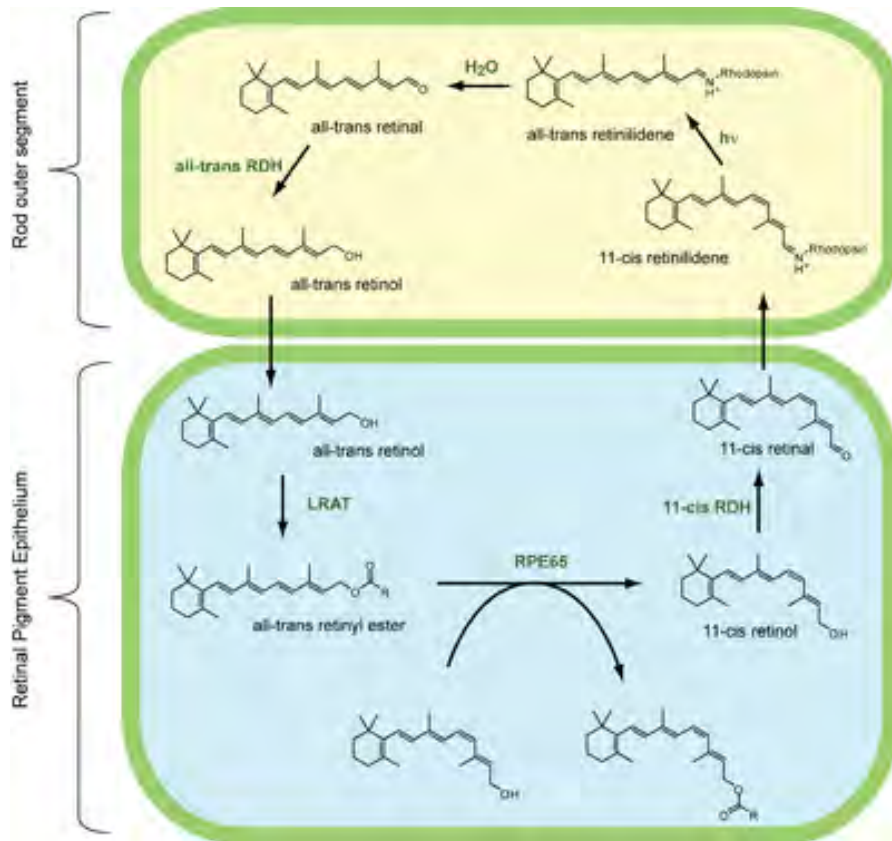


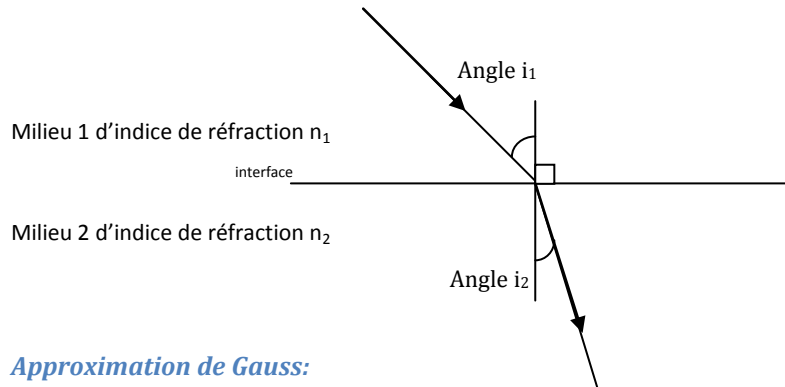
Figure 174 Réaction biochimiques induites par photo-isomérisation d'un bâtonnet

ANNEXE 6 Outils d'optique pour modélisation de l'œil humain

Calcul de la vergence : $V = 1/d$ où d est la distance « œil-objet » exprimée en dioptrie

Erreur réfractive : $E_r = -V$ Pour corriger une erreur provenant d'une lentille de vergence V

Réfraction : Loi de Snell Descartes : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$



Approximation de Gauss:

Gauss (1843) a utilisé l'approximation de premier ordre pour calculer les rapports d'image d'objet de base pour des surfaces de réfraction sphériques.

Réfraction et formation d'image (ray tracing) : 1 lentille sphérique

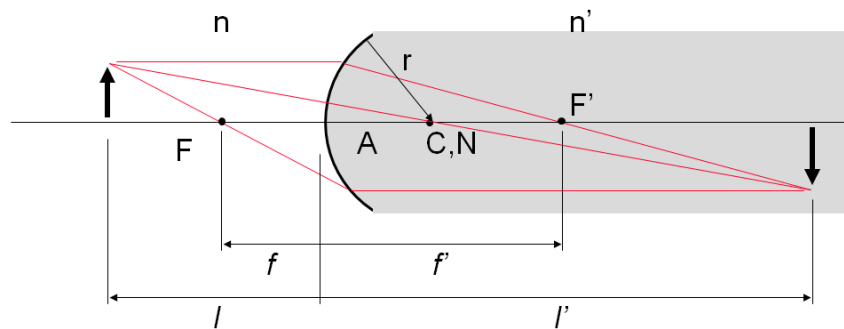


Figure 175 Schéma d'optique géométrique-formation d'image avec 1 dioptre sphérique (85)

n et n' : densités de milieu
F et F' : point focal objet et image
C : rayon de courbure
f et f' : distance focale objet et image

Réfraction et formation d'image (ray tracing) : lentille mince

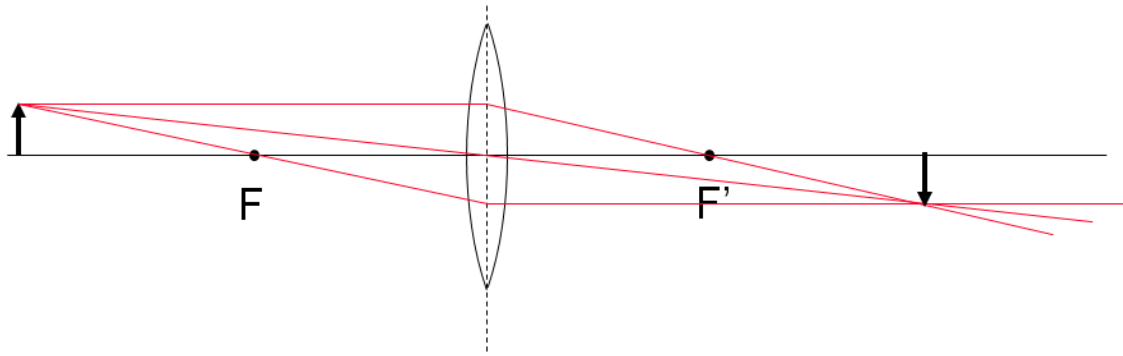
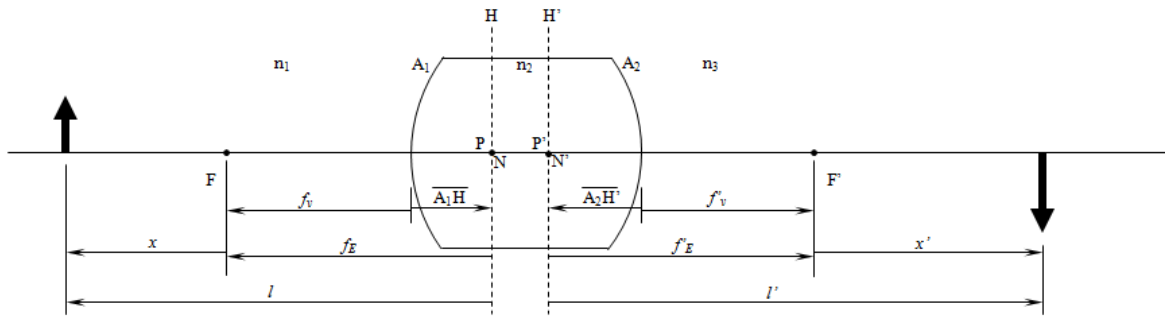


Figure 176 Schéma d'optique géométrique- formation d'image avec lentille mince (85)



A_1, A_2, \dots ≡ first, second, surface etc.
 n_1, n_2, n_3, \dots ≡ index of refraction of 1st 2nd 3rd media
 H ≡ primary (or first) principal plane
 H' ≡ secondary principal plane
 P ≡ primary (or first) principal point
 P' ≡ secondary principal point
 N ≡ primary (or first) nodal point *
 N' ≡ secondary nodal point *
 F ≡ primary focal point
 F' ≡ secondary focal point
 F_1, F_2, \dots ≡ power of 1st 2nd, surfaces
 F_E ≡ equivalent power
 F_V ≡ front vertex power
 F'_V ≡ back vertex power
 f_E ≡ primary equivalent focal length
 f'_E ≡ secondary equivalent focal length
 f_V ≡ first vertex focal length
 f'_V ≡ back vertex focal length
 l ≡ object distance from first principal plane
 l' ≡ image distance from secondary principal plane
 x ≡ distance from primary focal point to object
 x' ≡ distance from secondary focal point to image

$$F_E = F_1 + F_2 - \frac{t}{n_2} F_1 F_2$$

$$F_V = \frac{F_2}{1 - \frac{t}{n_2} F_2} + F_1 = \frac{F_E}{1 - \frac{t}{n_2} F_2}$$

$$F'_V = \frac{F_1}{1 - \frac{t}{n_2} F_1} + F_2 = \frac{F_E}{1 - \frac{t}{n_2} F_1}$$

$$F_E = -\frac{n_1}{f_E} = \frac{n_2}{f'_E}$$

$$F_V = \frac{-n_1}{f_V}$$

$$F'_V = \frac{n_2}{f'_V}$$

$$\overline{A_1 H} = f_V - f_E = n_1 \left(\frac{t}{n_2} \right) \left(\frac{F_2}{F_E} \right)$$

$$\overline{A_2 H'} = f'_V - f'_E = -n_2 \left(\frac{t}{n_2} \right) \left(\frac{F_1}{F_E} \right)$$

Keating conventions:

| Keating | Class (Freeman) |
|--------------------|--------------------|
| u, v | l, l' |
| u_1 | l |
| u_1 | l_v |
| U, V | L, L' |
| f_1, f_2 | f_1, f_2' |
| F_1, F_2 | F, F' |
| H_1, H_2 | H, H' |
| L_1, L_2 | A_1, A_2 |
| neutralizing power | front vertex power |

*In this example, the thick lens is in air and the nodal points coincide with the principal points. When the image media is different than the object media ($n_3 \neq n_1$) then they do not coincide. We will discuss this in more detail in the lectures.

Figure 177 Schéma optique détaillé - formation d'image avec lentille mince - Les points cardinaux (85)

Schéma de l'œil avec plans principaux primaire et secondaire (H et H'), et plans nodaux primaires et secondaires (N et N')

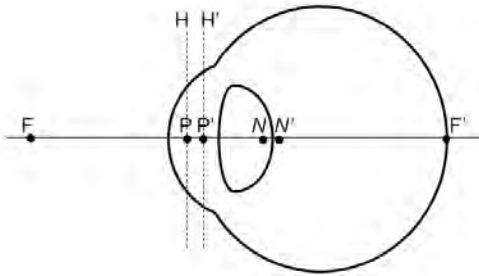


Figure 178 Optique géométrique -Schéma de l'œil par Bennett et Rabbett (3^{ème} Ed. p 210.) (85)

Axes de l'œil :

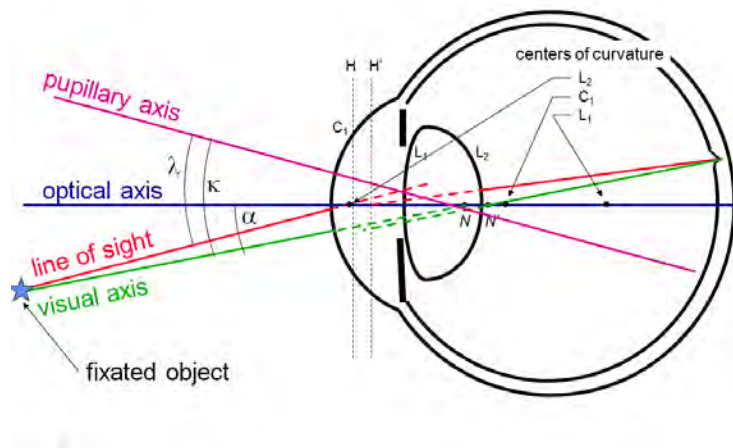


Figure 179 Optique géométrique - Axes de l'œil (85)

Accommodation :

- Ensemble des points de l'espace objet réel ou virtuel pouvant être vus nets. Compris entre le punctum remotum R et le punctum proximum P.
- Punctum remotum : point le plus éloigné pouvant être perçu net correspondant à un effort accommodatif nul
- Punctum proximum : point le plus proche pouvant être perçu net demandant un effort d'accommodation maximal.
- Quand l'œil est au repos (accommodation = 0), seul un objet placé dans le plan rémotal est perçu net.
- Si l'objet se rapproche de l'œil, que la puissance de l'œil ne varie pas, alors l'image se déplace dans le même sens et se forme derrière la rétine.
- Pour obtenir la netteté, l'œil augmente sa puissance pour replacer l'image sur la rétine
- Avec l'âge : le cristallin perd de sa souplesse -formule de Duane- (fonctionne entre 20 et 55 ans, au-delà la théorie est impossible)

Acuité visuelle :

- netteté à l'infini
- En théorie, l'acuité visuelle doit être identique en tout point du parcours d'accommodation (différent en réalité)

Influence optique de la taille de la pupille sur la netteté

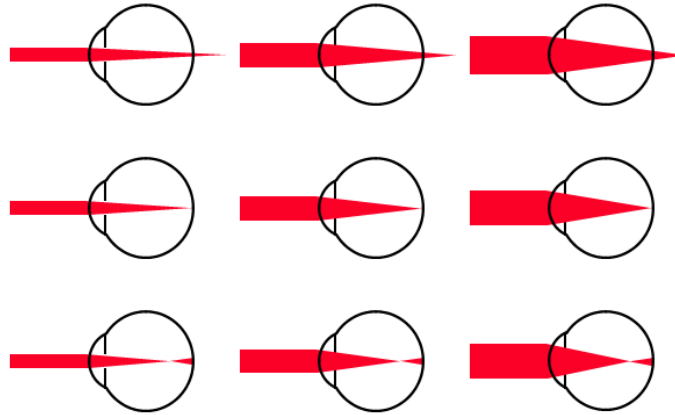


Figure 180 Optique géométrique - Erreur de formation de l'image en amont ou aval de la rétine selon l'ouverture de la pupille (85)



Figure 181 Impact de l'ouverture pupillaire sur la netteté des images reçues (85)

Diffraction de Fraunhofer ou diffraction en champ lointain

Se produit lorsque des rayons parallèles passent par une petite ouverture. Il y a interférence de la lumière. On obtient un diagramme de diffraction.

Quand l'ouverture est loin de la scène, on obtient le diagramme de Fraunhofer, qui se forme sur le plan focal de la rétine.

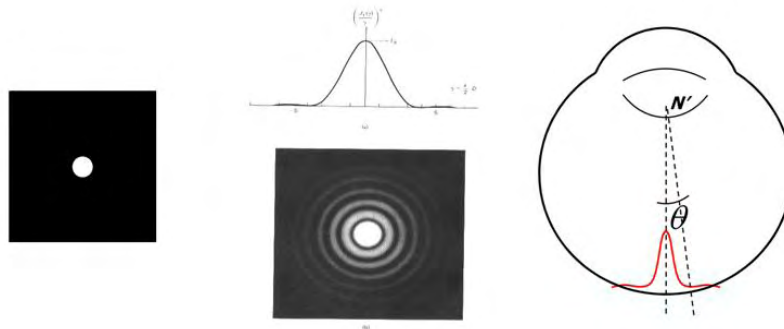


Figure 182 Diffraction de Fraunhofer - De gauche à droite : Ouverture circulaire (pupille), tâche d'Airy (front d'onde sur plan focal image) (Courbe d'intensité et vue sur plan focal image), représentation de la diffraction dans le plan focal image de l'œil (rétine) (85)

Aberration du front d'onde selon l'ouverture pupillaire

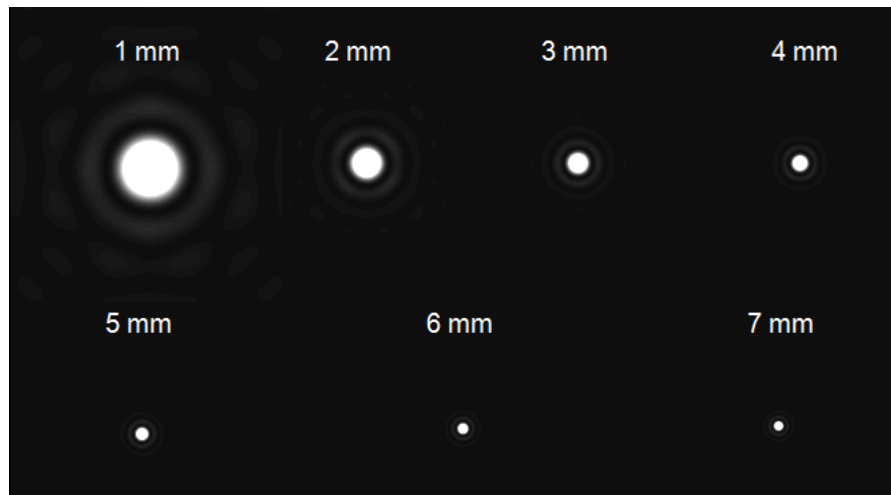


Figure 183 Front d'onde pour différentes ouverture pupillaires (en mm) - Œil humain parfait (85)

Diffusion de Mie

Il s'agit d'une loi d'optique ondulatoire qui décrit la diffusion de la lumière par des particules sphériques. Ceci peu s'appliquer dans le cas de la cataracte, ou pour considérer de petits corps flottants du vitré.

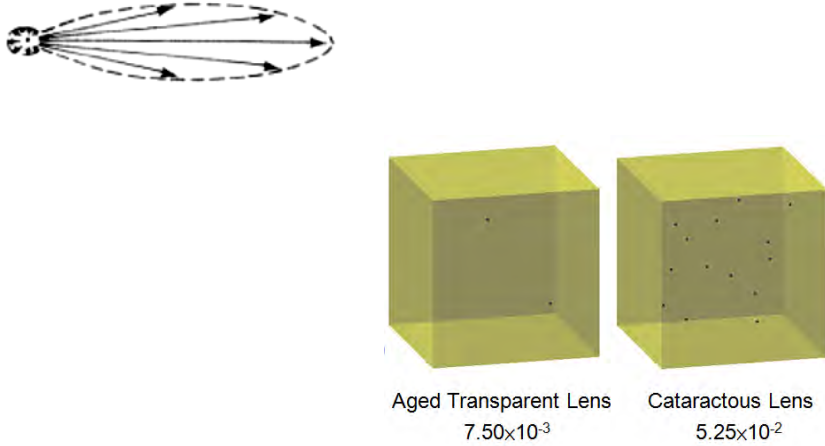


Figure 184 Diffusion volumétrique dans le cristallin pour modélisation d'un œil atteint de cataracte (86)

Eblouissement

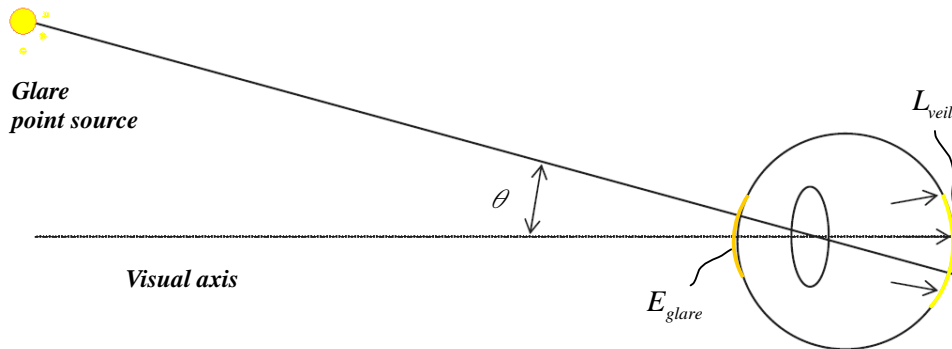


Figure 185 Eblouissement (86)

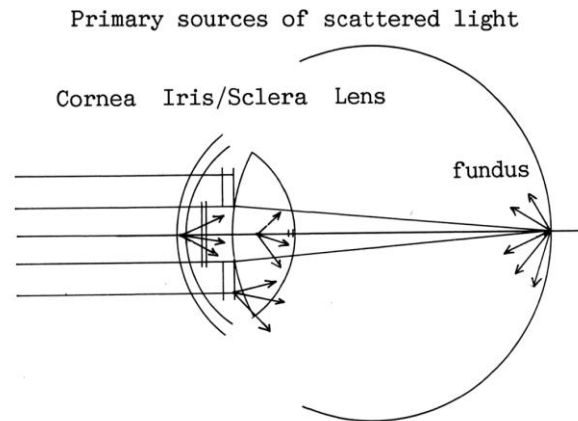


Figure 186 Lumière et éblouissement dans l'œil (87)

L'apparence de la lumière parasite sur la rétine est différent de la tâche d'Airy en disque, on a plutôt un modèle de stries très fines appelé couronne ciliaire qui représente l'éblouissement.

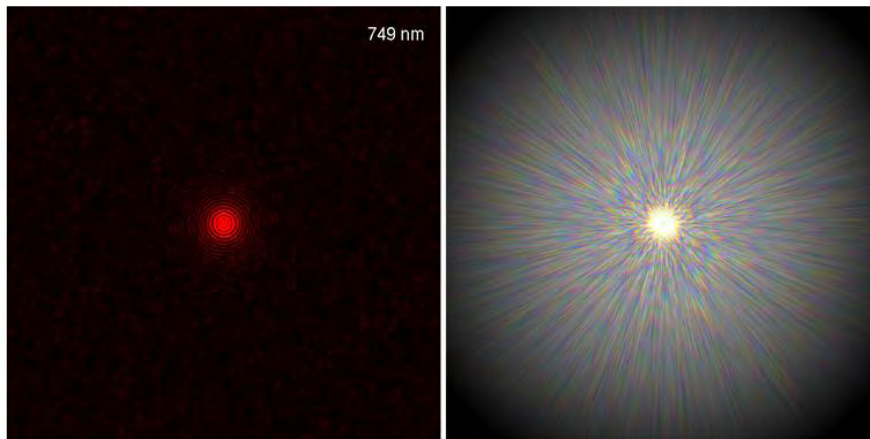


Figure 187 A gauche : diagramme de diffraction ;
A droite : couronne ciliaire (éblouissement) (87)

Aberration chromatique

Il y a aberration chromatique lorsque l'image d'un objet arrive sur différents plans de netteté selon la longueur d'onde de la lumière (et donc selon la couleur). (88) Ces aberrations sont donc principalement optiques, même si le phénomène d'adaptation intervient aussi.

Il existe deux types d'aberrations chromatiques qui ont lieu tant sur les yeux sains que malades: axiale (ou longitudinale) et latérale (ou transversale)

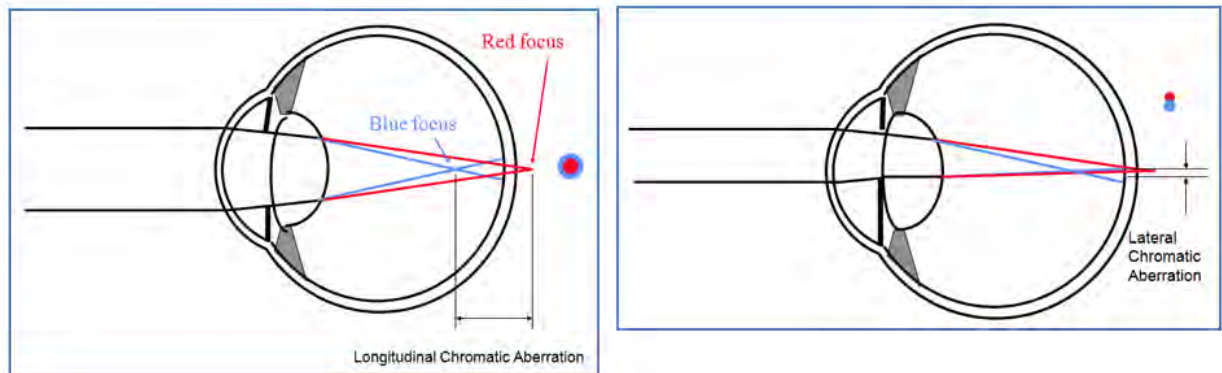


Figure 188 A gauche : Aberration chromatique axiale d'un œil sain; A droite : Aberration chromatique latérale (87)

Il existe donc des différences de grossissement comme nous pouvons l'observer sur la graphie précédent. Ci-dessous un graphique montrant comment on le détermine.

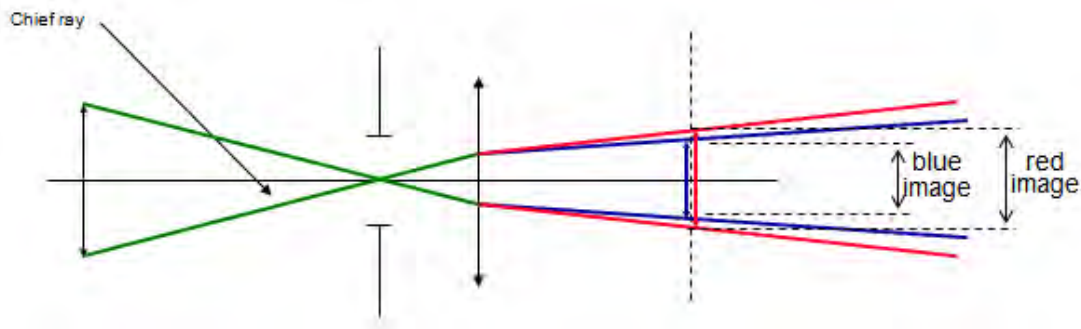


Figure 189 Différence chromatique de grossissement (87)

Ceci montre que pour un œil sain, le bleu étant la longueur d'onde la plus déviée, elle focalise avant le plan rétinien. Alors que le rouge, dont la longueur d'onde est moins réfractée, focalise en arrière du plan rétinien.

Il est important de noter que les aberrations concernant aussi les yeux atteints d'amétropie ou maladies.

Prenons l'exemple d'un œil myope : son point de focalisation se situe en amont de la rétine. Ainsi c'est le rouge qui convergera sur le plan rétinien, les autres couleurs convergeant en amont.

Remarque : La grandeur de défocalisation chromatique dépend de la luminance (Thibos, Bradley & Zhang, 1989)

Aberration sphérique ou aberrations de Seidel

« Il y a aberration sphérique lorsque les rayons lumineux passent par les bords d'une lentille et qu'il ne convergent pas sur le même plan que les rayons passant par le centre. Dans ce cas, il n'est pas possible d'obtenir une image nette sur les bords ou au centre. » (89)

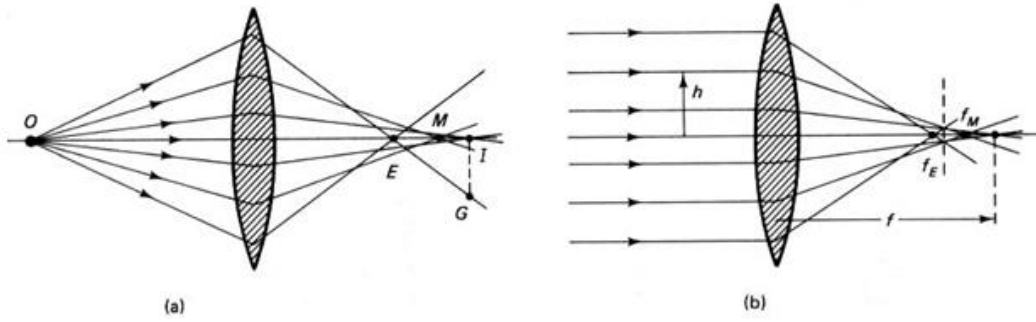


Figure 190 Aberration sphérique d'une lentille produisant a) des images à des distances différentes, b) différentes longueurs focales. Ceci dépendant de l'ouverture de la lentille (h rayon d'ouverture) (87)

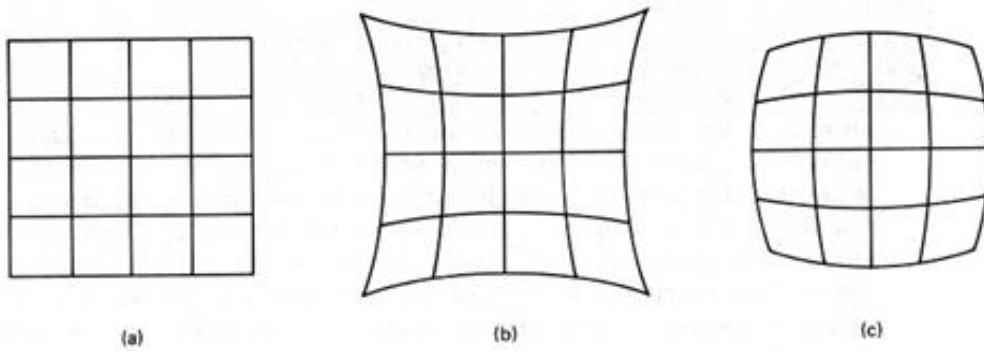


Figure 191 a) image sans distorsion : grille carrée - b) distorsion de l'image die « coussin » et c) « baril », dues à des grossissements non uniformes d'aberrations sphérique. (87)

L'ouverture pupillaire va impacter sur l'aberration sphérique :

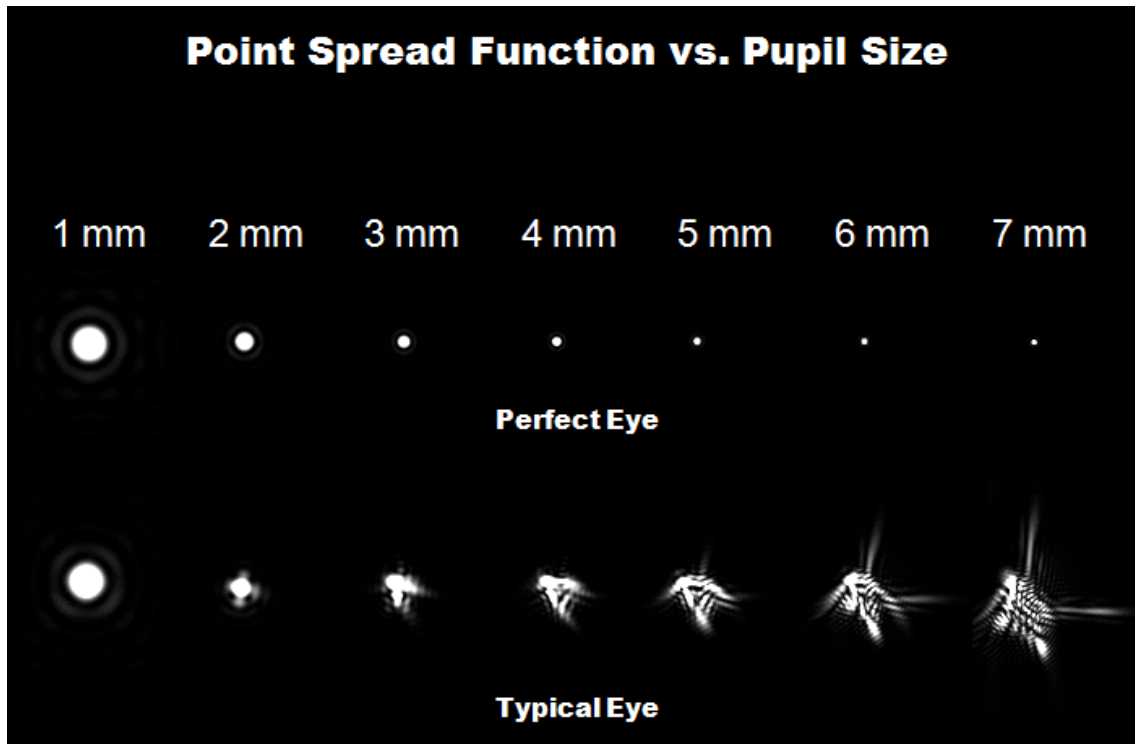
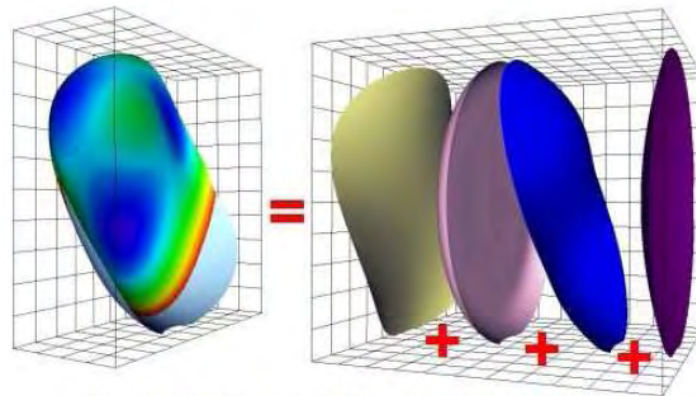


Figure 192 Fonction d'étalement de point : diffraction obtenue à différentes ouvertures pupillaires pour un œil parfait théorique et œil réel sain. (87)

Analyse de la mesure du front d'onde(90) :

Afin d'interpréter le front d'onde mesuré, il faut le décomposer en surface de front d'ondes élémentaires pour revenir aux aberrations élémentaires et les quantifier par le facteur de Zernike.



Ici le front d'onde analysé est la somme (de gauche à droite)
d'un Trefoil + Aberration sphérique + Coma + Défocus

Figure 193 Décomposition d'un front d'onde

Polynôme de zernike (90) :

« Les polynômes de Zernike sont un ensemble de fonctions mathématiques polynomiales permettant de décomposer des surfaces complexes en une somme infinie de surfaces élémentaires. Ces fonctions sont très souvent utilisées en optique pour analyser les fronts d'ondes. Ces fonctions sont notées :

$$Z_n^m$$

Où m est l'indice de fréquence angulaire et n est le degré du polynôme.

On représente souvent un échantillon de cet ensemble de fonctions élémentaires présentées ci-après (liste non exhaustive).

Pour chaque degré, il existe les mêmes surfaces à droite et à gauche. Les surfaces du côté droit (avec m positif) sont tournées de 90° par rapport à leur symétrique de gauche (m négatif). En combinant ces deux surfaces, on peut obtenir le même type de surface mais avec n'importe quelle orientation.

Lorsque le degré n est pair, la fréquence angulaire m est aussi paire.

Degré 0 : Appelé "Piston", ce degré ne correspond qu'à un décalage et n'a pas de conséquence sur la vision.

Degré 1 : Ces deux aberrations correspondent à des anomalies de centrage et n'affectent généralement pas la capacité visuelle.

Degré 2 : Ce degré correspond aux amétropies bien connues en lunetterie (myopie, hypermétropie et astigmatisme).

Degré 3 : C'est le début des aberrations de haut degré. Il s'agit ici du Trefoil et de la Coma.

Degré 4 : Il correspond au Tétrafoil (ou quadrifoil), l'astigmatisme secondaire et l'Aberration sphérique. »

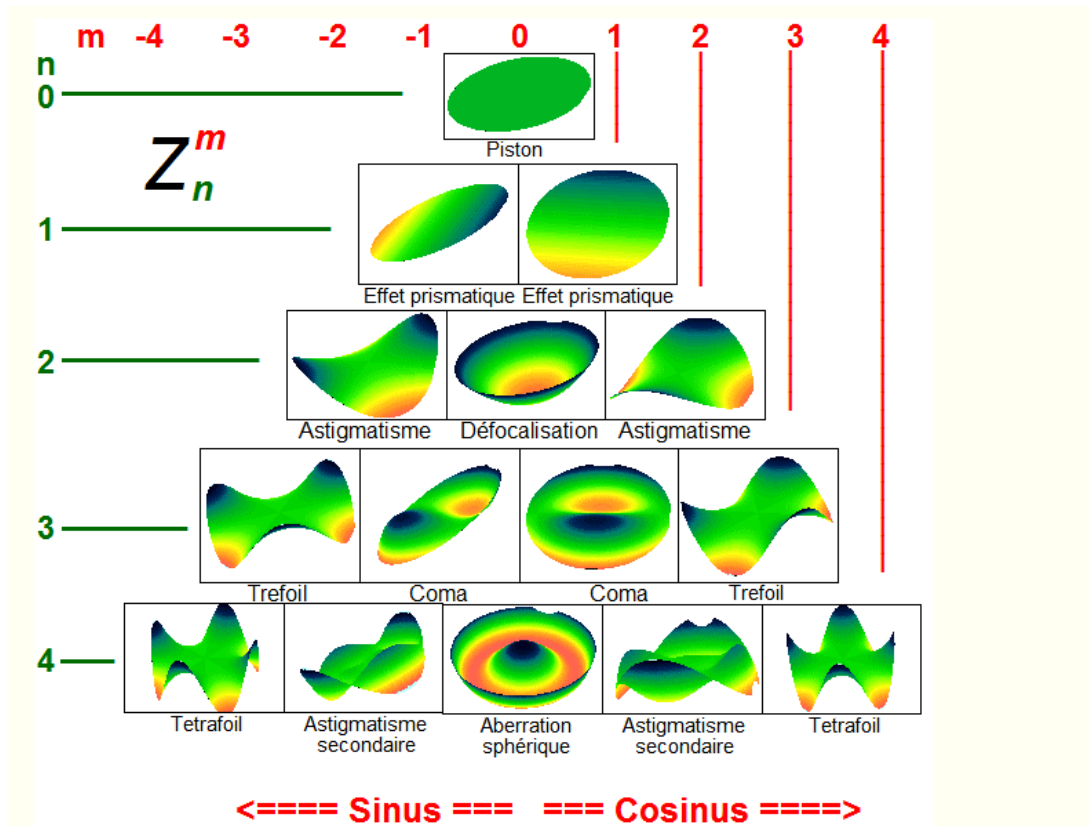


Figure 194 Fonctions élémentaires (90)

Il est intéressant d'utiliser les formes de Zernike car elles sont très similaires à des aberrations typiques trouvées dans les yeux.

La transformation de Fourier

Il s'agit de la décomposition d'un signal complexe en signaux oscillants élémentaires. Ceci peut s'appliquer sur des signaux électriques, sonores, visuels.

Chaque objet peut être considéré comme étant composé d'un réseau infini de fréquences spatiales de toutes orientations, chacun avec une amplitude et une phase spécifique.

Application à l'œil : Fonction transfert de modulation d'un système optique (MFT)

Elle est obtenue par le calcul de la Transformée de Fourier de la réponse processionnelle (image reçue sur la rétine) (91)

Prenons l'exemple ci-dessous où l'objet est une mire de fréquence spatiale variable, au contraste régulier (amplitude constante).

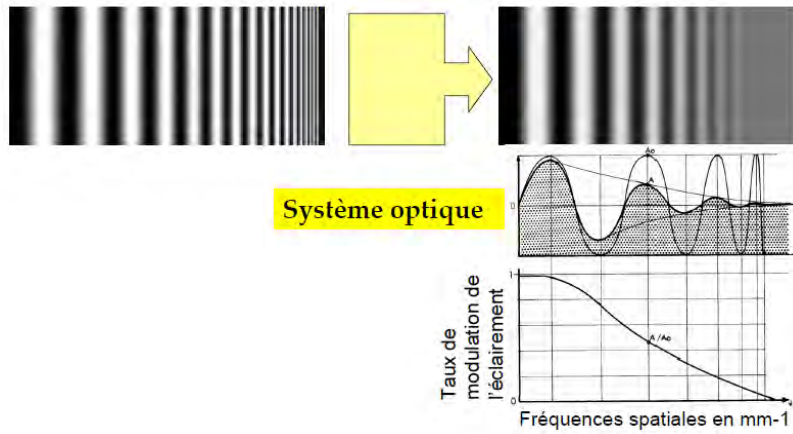


Figure 195 Perception d'une mire (90)

L'image rétinienne a subi les altérations d'un œil réel sain, et certains détails sont perdus. L'objet et l'image rétinienne peuvent être représentés par des sinusoides amorties. Par application de la transformée de Fourier, on obtient la modulation de l'éclairement.

ANNEXE 7 Impact de l'âge sur le temps d'adaptation à l'obscurité

Afin de mettre en place un abaque d'adaptation à l'obscurité en fonction de l'âge, les individus ont tout d'abord été éblouis par un flash de 1600 mL (soit une luminance d'environ 5093 cd/m²) pour pouvoir ensuite plonger les observateurs dans différentes conditions d'obscurité dont la luminance est plus faible que le flash, il s'agit de **luminances d'adaptation**.

Remarque : les luminances d'adaptation étudiées appartiennent aux conditions mésopiques ou photopiques, ce qui se traduit par l'action différenciée des photorécepteurs visuels pour un individu.

Rappel : 1 Lambert (L) \Leftrightarrow 3183 cd/m²

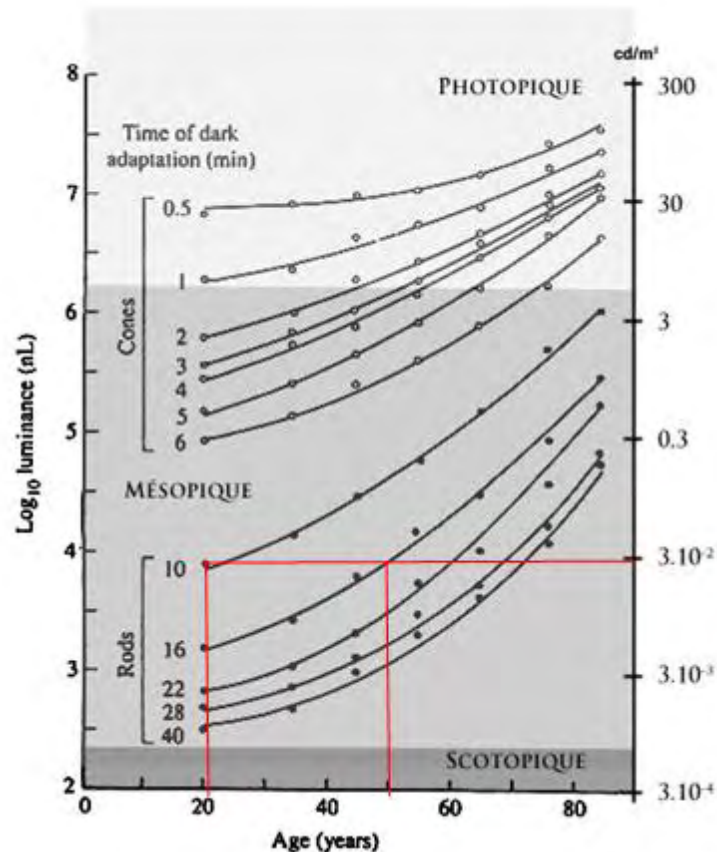


Figure 196 Temps d'adaptation à l'obscurité des photorécepteurs visuels en fonction de l'âge. Ronds blancs : cônes / ronds noirs bâtonnets (92)

On remarque que plus la luminance d'adaptation est faible, plus le temps d'adaptation à l'obscurité est long. De même, plus on vieillit, plus ce temps d'adaptation, pour une même luminance d'adaptation, sera grand.

Par exemple, à une luminance d'adaptation de $3 \cdot 10^{-2} \text{cd/m}^2$, un individu âgé de 20 ans mettra 10 min à s'adapter, alors qu'un individu âgé de 50 ans mettra 16 min. Seuls les bâtonnets interviendront dans la réponse.

En revanche, pour une luminance d'adaptation de 1cd/m^2 , selon l'âge, ce n'est pas le même photorécepteur qui est mis en jeu dans la réponse. (cf. tracés rouge sur le graphe) Pour un individu de 20 ans, ce sont les cônes qui mettront presque 5 minutes à s'adapter. Mais pour un individu de 68 ans, ce sont les bâtonnets qui interviendront et nécessiteront 10 minutes d'adaptation.

ANNEXE 8 Troubles visuels

1. Définition de termes médicaux

La santé et la maladie sont parties intégrantes de la vie, du processus biologique et des interactions avec le milieu social et environnemental.

Maladie :

- se réfère à l'altération des fonctions ou de la santé d'un organisme vivant, animal ou végétal
- opposé à **santé**

Pathologie : (93)

- science qui a pour objet l'étude des maladies (causes, symptômes et évolution) et des effets qu'elles provoquent (lésions, troubles) ;
- à différencier des termes : blessures / handicaps / syndromes / affections

Maladie congénitale :

- due à une malformation présente dès la naissance ;
- elle n'est pas forcément d'origine génétique (par intoxication par exemple) ;
- lorsqu'elle est génétique, elle n'est pas forcément héritée (dans ce cas, on parle de « mutation de novo »).

Maladie héréditaire = maladie génétique :

- liée à une anomalie des chromosomes ou de leurs gènes constitutifs
- A l'inverse, elle est souvent congénitale puisque l'anomalie chromosomique ou génique a été transmise dès la conception de l'embryon.

Maladie complexe :

- due à l'interaction entre un profil génétique particulier et un environnement particulier ;
- quelques exemples :
 - Obésité,
 - Diabète,
 - Hypertension artérielle,
 - Athérome et athérosclérose,
 - Asthme,
 - Maladies dysimmunitaires ou auto-immunes,
 - Maladies neurodégénératives (maladie d'Alzheimer, maladie de Parkinson, sclérose latérale amyotrophique).

Epidémiologie :

- discipline étudiant les différents facteurs qui interviennent dans l'apparition des maladies, leur fréquence, leur mode de distribution, leur évolution et la mise en œuvre des moyens nécessaires à leur prévention (94).

MODELE DE WOOD (déficience /Incapacité /handicap) (95) :

Les mots n'ayant pas le même sens selon les pays, l'Organisation Mondiale de la Santé a proposé en 1980 une classification connue sous le nom de modèle de Wood, la « Classification Internationale des infirmités, incapacités et handicaps, OMS, 1980 », traduite en français sous le titre : « **Classification Internationale des Handicaps : déficiences, incapacités et désavantages.** »

- **La déficience** (synonyme : **infirmité**) du fonctionnement d'un organe ou d'un système est évaluée par rapport au fonctionnement habituel de cet organe ;
- **L'incapacité** représente les conséquences de la déficience d'un organe ou d'un système sur le fonctionnement de l'individu en termes de limitation de fonctions ou de restriction d'activités ;
- **Le handicap** (ou **désavantage**) est l'écart ou l'intervalle entre l'incapacité de l'individu et les ressources personnelles, matérielles et sociales dont il dispose pour pallier ces incapacités. Cet écart lui confère un désavantage social.

Trouble visuel :

- conséquence d'une déficience ou maladie ou infection
- peuvent être congénitaux ou apparaître de façon brutale ou progressive.

Déficience visuelle = défaillance visuelle (96) :

- donnée objective : elle est mesurable, quantifiable par des outils et des spécialistes tels que les ophtalmologistes, les orthoptistes, et les neurophysiologistes.
- peut provoquer un handicap, mais dans tous les cas, il est concevable d'avoir une atteinte de l'œil et des voies optiques sans que cette déficience n'ait de conséquences fonctionnelles sensibles pour la personne et sans donc qu'elle implique les gênes dans la vie quotidienne qui justifient le terme de « handicap ».

Cécité :

- signifie perte de la vision de façon complète ou incomplète (i.e. juste d'un œil).

2. Déficiences visuelles

a. Problème de conformation : amétropies

Les amétropies sont des défauts visuels basés sur des troubles de réfraction.

Il existe :

- La myopie ;
- L'hypermétropie ;
- L'astigmatisme.

La presbytie est liée à l'âge, mais nous présenterons tout de même ce défaut dans ce paragraphe.

Myopie ou hypométrie

La myopie touche 7 millions de français (26% de la population) et touche environ 20% de jeunes âgés de moins de 20 ans.

Il existe 2 types de myopie :

- myopie axiale ou axiale pour laquelle l'œil est trop long pour sa puissance ou trop convergent pour sa longueur. La distance cornée-rétine est en cause.
Remarque : 1 mm de différence de longueur axiale implique une différence d'amétropie de 3 dioptries. Voici les valeurs limites : $24,15\text{mm}$ (ou 25mm) $\leq d_{\text{Cornée-Rétine}} \leq 28,75\text{ mm}$
- Myopie de puissance ou sphérique, pour laquelle le rayon de courbure de la cornée est modifié.

Dans les 2 cas, le foyer image est en avant de la rétine, ce qui concrètement fait que l'individu voit flou en vision de loin et net en vision de près (à partir d'une distance rapprochée).

Par décomposition spectrale, le jaune arrive en avant du plan de la rétine et le rouge dans le plan de la rétine.

La myopie peut se corriger par corrections optiques : lunettes ou lentilles, et il est conseillé de garder sa correction optique tout le temps pour réhabituer ses muscles à l'accommodation.

Remarque : Il semblerait que les myopies fortes touchent en proportion deux fois plus les femmes que les hommes.

Hypermétropie / Hypéropie

L'hypermétropie touche neuf millions de Français.

Un œil hypermétrope a un problème axile. Plus précisément il est trop court pour sa puissance ou pas assez convergent pour sa longueur. Du coup, son foyer image va se retrouver en arrière de la rétine.

Ainsi, l'individu va voir net à l'infini en accommodant de la valeur de sa réfraction, cet effort étant plus pénible en fonction de la valeur de l'hypéropie et des réserves accommodatives, et il verra flou de près. Cette conformation peut s'accompagner de particularités anatomiques pouvant être à l'origine d'un glaucome par exemple.

Par décomposition spectrale, le jaune arrive en arrière du plan de la rétine et le bleu dans le plan de la rétine.

Les signes fonctionnels dépendent de l'individu, mais il n'est pas rare que l'individu se plaigne d'efforts accommodatifs prolongés, souvent le soir après par exemple une journée au travail sur ordinateurs en vision proche.

dCornée-Rétine <24,15 mm (ou 25 mm)

Astigmatisme

Il existe deux types d'astigmatisme :

- l'astigmatisme conforme qui se manifeste par un allongement des lignes verticales.
- L'astigmatisme inverse où les lignes horizontales sont allongées
- l'astigmatisme oblique, qui lui, se manifeste par l'allongement de lignes où les lignes sont obliques.

Ce trouble est issu d'une modification de la courbure de la cornée ou du cristallin qui va faire que l'individu aura une vision floue et déformée de près et de loin. Les allongements des lignes expliquent que l'individu astigmaté va confondre certaines lettres proches comme le M, N et H, le E et le B, ou encore le 8 et le 0. Et un simple point sera perçu comme une droite au contour flouté.

Un astigmatisme léger pourra engendrer seulement des plissements des yeux, des mots de têtes, des fatigues oculaires, ainsi que de la photophobie à la lumière vive.

Remarque : l'astigmatisme n'exclut pas la myopie ou l'hypermétropie. Et l'astigmatisme retarde la presbytie.

Presbytie

La presbytie n'est pas une amétropie, mais peut se cumuler à une amétropie. C'est pour cela que bien souvent ce trouble visuel est présenté à la suite des amétropies. Généralement, la presbytie surviendra plus tard chez une personne myope, et plus tôt chez une personne hypermétrope.

Elle touche 22 millions de Français.

La presbytie correspond à une diminution du pouvoir d'accommodation, dû à l'âge, généralement dès 45 ans, et apparaît de façon progressive touchant les deux yeux simultanément. Ceci s'explique par le fait qu'avec l'âge, le cristallin va perdre de son élasticité, se durcir et s'aplanir. La diminution de performance du muscle ciliaire est aussi en cause.

Au final, l'individu aura donc des difficultés à faire la mise au point sur des objets proches. Par exemple, pour la lecture, l'individu reculera son livre pour lire et aura besoin d'un fort éclairage. Cependant ceci ne sera efficace qu'au début.

Une correction optique avec des verres progressifs permet de contrer les effets.

Quelques valeurs numériques

Pour un œil emmétrope :

➤ Cornée :

Rayon de courbure antérieur = 7.8 mm

Rayon de courbure postérieur = 6.8 mm

Densité du milieu = 1.377

➤ Cristallin

Rayon de courbure antérieur = 10 mm

Rayon de courbure postérieur = 6 mm

Densité du milieu = 1.413

➤ Humeur aqueuse ⇒ Densité du milieu = 1.337

➤ Humeur vitrée ⇒ Densité du milieu = 1.336

➤ OEil emmétrope ⇒ Distance cristallin antérieur - rétine = 16.58 mm

➤ OEil myope axile ⇒ Distance cristallin antérieur - rétine = 18.6 mm

➤ OEil hypermétrope axile ⇒ Distance cristallin antérieur - rétine = 14.5 mm

b. Le daltonisme

Il s'agit d'une maladie héréditaire de la perception des couleurs qui touche principalement les pigments rouges et verts (mutation de gènes).

Le chromosome sexuel X (présent en un seul exemplaire chez l'homme) possède les gènes codant les pigments rouges et verts. Le gène codant le pigment bleu se trouve lui sur le chromosome 7.

Ainsi, on dénote en France, 4.8 millions de français touchés par le daltonisme, dont 99% d'hommes.

Il existe différentes formes et degrés de déficience de vision des couleurs. Il peut s'agir d'une absence d'un des trois canaux (dyschromatopsie) colorés ou bien d'une déficience d'un canal coloré. (Trichromatisme) Et plus l'anomalie sera importante, plus la gêne occasionnée au porteur sera grande.

Absence d'un des trois canaux colorés :

Lorsqu'il s'agit de l'absence d'un cône, le sujet sera dit dichromate.

- protanopie : le canal rouge est absent
- deutéranopie (le plus fréquent) : le canal vert est absent
- tritanopie (le plus rare) : le canal bleu est absent

Deux mécanismes colorés sont donc actifs. Ainsi, il existera une zone neutre dans le spectre de part l'absence d'un des mécanismes et une zone neutre complémentaire existera aussi.

Par exemple pour le type deutan / deutéranope : la zone neutre est dans le vert et la zone complémentaire est le pourpre.



Figure 197 a) Représentation du spectre coloré de la lumière blanche, et b) de celui d'un individu atteint de daltonisme du vert (deutéranopie). (97)

Chez les dichromates, il existe de grandes confusions colorées, ce qui affecte la perception de l'environnement de vie.

Ainsi certaines tâches professionnelles nécessitant une forte connaissance et utilisation des couleurs deviennent impossibles, puisque adaptées pour les trichromates.

Déficience d'un des trois canaux colorés : daltonisme

Lorsqu'il s'agit de la déficience d'un cône, le sujet est dit trichromate anormal

- protanomalie : le canal rouge est déficient
- deutéranomalie (le plus fréquent) : le canal vert est déficient
- tritanomalie (le plus rare) : le canal bleu est déficient

Dans la vie de tous les jours, les erreurs sont peu visibles, cependant la vision de l'environnement de vie entourant les sujets trichromates anormaux est quelque peu modifiée, puisque malgré tout, deux couleurs dominant et l'autre reste un peu voire presque totalement absente (selon le degré de l'anomalie). Ils restent cependant trichromates car ils distinguent suffisamment de nuances.

Déficience des trois canaux colorés :

Il s'agit de l'achromatopsie dit aussi monochromatisme. C'est un cas très rare (1/40 000), où la personne est dans l'incapacité totale de distinguer les couleurs car il n'existe qu'un seul mécanisme coloré. Elle voit le monde en nuances de gris (clarté et luminance) car ne possède pas les notions de couleur, ni leur comparaison physiologique des mécanismes colorés.

Ce défaut de vision peut être héréditaire ou secondaire.

Remarque : l'achromatopsie s'accompagne d'une anomalie importante de toutes les fonctions visuelles diurnes (scotopique) (98)

Figure 198 illustre les différents types de déficiences à la couleur :

| | Achromate <i>(Absence totale de perception des couleurs)</i> | Dichromate <i>(Absence du gène, donc du pigment)</i> | Trichromate anormal <i>(le gène est hybride donc le pigment a une sensibilité différente)</i> |
|------------------------------|--|--|---|
| Cône L Rouge (Protan) | Achromate (monochromate) | Protanope | Protanomal |
| Cône M Vert (Deutan) | | Deutéranope | Deutéranomal |
| Cône S Bleu (Tritan) | | Tritanope | Tritanomal |

Figure 198 différents types de déficiences à la couleur (97)

Figure 199 donne un aperçu de la vision des couleurs selon le type de daltonisme







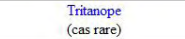
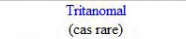
| | | | |
|---|---|--|--|
|  | Achromate (<i>Absence totale de perception des couleurs</i>) | Dichromate (<i>Absence du gène, donc du pigment</i>) | Trichromate anormal (<i>le gène est hybride donc le pigment a une sensibilité différente</i>) |
| Cône L Rouge (Protan) |  Achromate (monochromate) |  Protanope |  Protanomal |
| Cône M Vert (Deutan) | |  Deutéranope |  Deutéranomal (Type le plus fréquent) |
| Cône S Bleu (Tritan) | |  Tritanope (cas rare) |  Tritanomal (cas rare) |

Figure 199 vision des couleurs selon le type de daltonisme (97)

Plus l'anomalie est importante, plus la gêne du porteur est grande. Le daltonisme ne se soigne pas et l'individu devra vivre avec. Ceci le rend donc totalement inapte à toute tâche professionnelle ayant une forte implication colorée, des erreurs ou accidents pouvant survenir.

Ci-dessous un tableau illustrant la fréquence des divers types de déficiences de vision des couleurs en Europe: (97)

| Types de déficiences | Fréquences dans la population (%) | |
|--|-----------------------------------|----------------|
| | Homme | Femme |
| 1. Monochromatisme | Très rare | Très rare |
| 2. Dichromatisme | 2,105 | 0,06 |
| Protanope | 1,0 | 0,02 |
| Deutéranope | 1,1 | 0,01 |
| Tritanope | 0,005 | 0,003 |
| 3. Trichromatisme Anormal | 5,9 | 0,40 |
| Protanomal | 1,0 | 0,02 |
| Deutéranomal | 4,9 | 0,38 |
| Tritanomal | Assez rare | Assez rare |
| <i>Déficience de vision des couleurs</i> | 8,0 (environ) | 0,46 (environ) |

3. Maladies oculaires

a. Maladies oculaires directes

DMLA

La dégénérescence maculaire liée à l'âge est une maladie de la rétine très courante. Elle affecte la région rétinienne appelée macula.

Il en existe de deux sortes :

- DMLA forme « sèche » : altération progressive du tissu maculaire ;
- DMLA forme "humide" ou "exsudative" : prolifération de néovaisseaux sous la rétine et épaississement de la macula (deux tiers des cas).

Elles se caractérisent toutes les deux par la perte progressive de la vision centrale (donc perte d'acuité visuelle) bien souvent bilatérale, mais la vision périphérique reste intacte. En stade plus avancé, le patient perçoit une tâche au centre de son champ de vision et un phénomène de métamorphopsie va également apparaître (déformation des lignes droites.)

C'est une maladie très courante et invalidante qui affecte 1 million de français, et c'est la première cause de handicap visuel après 50 ans.

Actuellement, il n'existe aucun traitement, juste quelques opérations permettant d'atténuer les gênes de certaines formes de DMLA.

Remarque : plusieurs facteurs augmentent les risques de développer une DMLA : des facteurs génétiques facilitant son apparition, le tabagisme, le surpoids, etc. (99)

Cataracte

Avec l'âge, il y a modification de la composition chimique du cristallin. Ceci se traduit par l'apparition d'une zone d'opacité partielle ou totale du cristallin (perte de transparence).

La cataracte sénile est la plus courante, et peut commencer à apparaître dès 60 ans, par une baisse progressive de l'acuité visuelle, une sensation de brouillard et peut même entraîner une photophobie.

L'opacification jaune du cristallin va affecter la perception des couleurs, citons pour illustrer ces impacts les séries d'œuvres de même sujet de l'artiste peintre Monnet qui atteint de cataracte peignait avec des couleurs plus jaunes son jardin qu'il voyait différemment étant jeune.

La chirurgie permet généralement de soigner la cataracte où le cristallin est remplacé par un cristallin artificiel.

Remarque : la cataracte est la première cause de cécité dans les pays en voie de développement.

Décollement rétinien

Le décollement rétinien est un dysfonctionnement de la rétine. Il se caractérise par un détachement de l'épithélium pigmentaire de la rétine qui supporte les photorécepteurs. Ce décollement fera que les photorécepteurs seront atrophiés, ce qui est irréversible.

Le plus souvent le décollement rétinien est dû à une déchirure de la rétine à cause de la traction du corps vitré. Le liquide de ce dernier va alors s'infiltrer sous la rétine, et soulever l'épithélium pigmentaire.

Il en résultera que l'individu percevra des éclairs et des corps flottants accompagnés d'une ombre qui se déplace au centre de la vision.

Remarque : il est possible d'avoir recours à la chirurgie pour un décollement rétinien hors zone fovéale.

b. Maladies oculaire indirectes

a) Diabète

Le diabète est l'une des cinq principales causes de cécité en Europe.

Il va impacter sur la vision et être à l'origine de rétinopathies diabétique caractérisée par une atteinte bilatérale. Les symptômes visuels seront minimes tant qu'elle n'entraîne pas une perte de vision. (100)

Au fur et à mesure de l'évolution de la rétinopathie, des effets vont survenir tels que : la perte de vision nocturne, baisse de l'acuité visuelle, une vision floue, des corps flottants, des tâches noires ou des flashes lumineux dans le champ de vision, ainsi qu'une perte de vision brutale, indolore et importante. Ceci étant parfois à mettre en relation avec un décollement rétinien ou hémorragie vitréenne.

b) Approche de la maladie d'Alzheimer

« La maladie d'Alzheimer passe par différentes phases, qui en huit à douze ans aboutiront au décès du patient. Si l'évolution et la durée varient d'un individu à l'autre, on constate que les cas précoces ont tendance à évoluer plus rapidement. » (101)

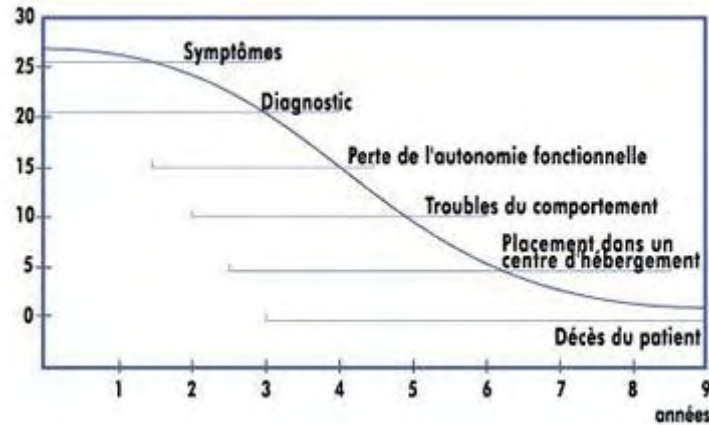


Figure 200 Evolution de la maladie d'Alzheimer (D'après Feldman et Gracon, 1996) (101)

Durant la maladie d'Alzheimer, des pertes sensorielles se manifestent. « Les problèmes de vision sont un sujet de préoccupation parce que plus de soixante pour cent des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer auront un déclin dans une sorte de capacité visuelle. Les problèmes surviennent le plus souvent dans quatre domaines »: (102)

- la cécité de mouvement : la perception de l'environnement est une suite d'images fixes qui ne défilent pas. « Les médecins ont émis l'hypothèse que cette vision du monde fait que les personnes se perdent, même dans un environnement familier » ;
- la perception de la profondeur : les objets 3D apparaissent plats, il y a perte du modelé. Aussi, les ombres ou zones sombres peuvent apparaître au patient comme des trous ;
- perception des couleurs : perte plus rapide de la perception des couleurs, surtout pour les couleurs dans la gamme bleu-violet ;
- La sensibilité aux contrastes : réduction de la perte de contraste de couleur et de luminosité. Aussi, en couplant cet effet aux autres, par exemple, si une assiette blanche est posée sur une table blanche, le patient peut ne pas la distinguer.

La maladie se caractérise par des pertes sensorielles ainsi qu'un impact cognitif. « Dans l'étude de Lannonet al. (2006) avec des sujets âgés de 65 ans et plus, les hallucinations simples apparaissaient en général une semaine après la baisse de vision alors que les hallucinations complexes apparaissaient en général un an après la baisse. Par contre, ces observations ne concordent pas nécessairement avec celles notées dans d'autres études. Il existe toutefois peu de données empiriques sur les hallucinations simples et leurs conséquences psychologiques. Une recension récente de la littérature (Menon et al. 2003) indique qu'entre 41 % et 59 % des personnes atteintes d'un problème visuel présentent des hallucinations visuelles de type simple». Il semblerait que le syndrome de Charles Bonnet, peu connu de la population déficiente visuelle, explique les hallucinations des patients atteints d'Alzheimer. » (103)

ANNEXE 9 Epilepsie photosensible

1. Descriptif

L'effet le plus connu est l'épilepsie photosensible. Il s'agit d'une sensibilité aux lumières clignotantes ou scintillantes, habituellement de forte intensité, ayant un profil pulsatile régulier. Ce type de lumières incommodent bien des gens, mais il peut déclencher des crises chez les personnes souffrant d'épilepsie photosensible. Les crises peuvent prendre diverses formes. Il apparaît le plus souvent des crises tonico-cloniques, des crises d'absence, des crises myocloniques ou moins souvent, des crises partielles simples ou complexes. (69)

On estime que l'épilepsie photosensible constitue moins de 5 % de cas d'épilepsie. Environ une personne sur 4000 individus est reconnue comme étant sujette à l'épilepsie photosensible. Cependant, un nombre inconnu de personnes photosensibles n'ont jamais eu de crises. A l'opposé le scintillement peut déclencher des crises chez des individus sans antécédent d'épilepsie.

Ce type d'épilepsie est plus courant chez les enfants et survient habituellement chez les jeunes, âgés de 8 à 20 ans. La fréquence la plus élevée se situe vers l'âge de 12 à 13 ans, ce qui évoque un lien avec l'apparition précoce de la puberté. Les filles sont plus souvent touchées que les garçons. Certaines données semblent indiquer que la photosensibilité peut disparaître avec l'âge mais $\frac{3}{4}$ des patients restent sensibles à vie. (104) L'épilepsie photosensible est largement héréditaire, quoique son caractère génétique soit complexe. Dans le cas d'une performance visuelle réduite (par exemple, les patients souffrant de glaucome), les effets de scintillement peuvent varier d'une sensation de malaise à l'apparition de crises d'épilepsie.

Hormis des scintillements de lumière, certains motifs de contraste spatial peuvent également provoquer des crises convulsives. Ainsi approximativement $\frac{1}{3}$ des patients sont sensibles à ce mode de déclenchement de l'épilepsie. Par ailleurs, une source de lumière naturelle est tout aussi susceptible de provoquer des crises chez les sujets photosensibles que les sources de lumière artificielle. Par exemple, le reflet du soleil sur l'eau ou à travers les feuilles des arbres, ou encore le passage le long de grilles peuvent occasionner des crises.

2. Fréquence de vibration et crises épileptiques photosensibles

« De nombreux facteurs peuvent se combiner pour influencer sur la probabilité des crises, notamment la fréquence des flashes. Tout changement répétitif dans un stimulus visuel à l'intérieur de la gamme de fréquences de 3Hz à 65Hz, est un risque potentiel et la plus grande probabilité de convulsions apparaît pour des fréquences dans la plage de 15Hz à 20Hz. Ainsi, il serait préférable que les flashes ne soient pas rythmés" (44)

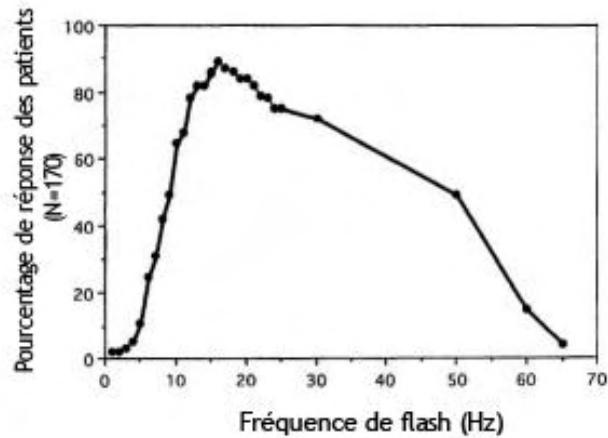


Figure 201 Pourcentage de patients avec épilepsie photosensible montrant des réponses par électro-encéphalographie (EEG) pour un papillotement de la lumière issu d'une lampe à décharge à xénon ; en abscisse : fréquence des flashes, en ordonnée : pourcentage de réponse (Harding and Jeavons, 1994). (8)

3. Facteurs influant sur la réponse à un signal vibratoire régulier

- La luminance : la stimulation en dessous de 1 cd/m^2 (scotopique et faible mésopique) présente de faibles risques. Par contre, les risques augmentent avec le logarithme de la luminance en niveau haut mésopique et photopique
- Le contraste représente environ 10% de risques potentiels.
- La distance « observateur-source » détermine l'aire totale réceptrice de la stimulation par la rétine.
- La localisation du stimulus : un stimulus présenté dans la vision centrale présente plus de risques qu'en vision périphérique, même si, de part la répartition des photorécepteurs, le papillotement de la lumière dans la périphérie peut être plus perceptible.
- La longueur d'onde de la lumière : un clignotement en alternance de lumière rouge et bleue peut être particulièrement dangereux.
- Si une personne a les yeux ouverts ou fermés : un scintillement lumineux peut être plus dangereux lorsque les yeux sont fermés, en partie parce que la pupille est ouverte, ainsi la rétine entière est stimulée. Toutefois, si la lumière vibrante n'atteint plus la rétine d'un des deux yeux (en plaçant la paume de la main sur cet œil), les effets du scintillement sont très fortement réduits dans la plupart des cas cliniques. » (44)

4. Sources et épilepsie

Le papillotement de la lumière est un attribut indésirable de tout système d'éclairage et les LEDs ne sont pas une exception.

Les sources ponctuelles de lumière sont moins susceptibles de provoquer des crises et des maux de tête qu'une source diffuse qui couvre l'ensemble du champ visuel d'une personne. Toutefois de larges sources de lumière constituées d'une juxtaposition de sources ponctuelles ont le potentiel de provoquer des crises chez les sujets présentant une épilepsie photosensible. (38)

5. La TV, les jeux vidéo et le papillotement de la lumière

La télévision nous présente des images successives, avec de nombreuses informations : contrastes de luminance et chromatique spatial mêlés à un contraste de luminance et chromatique temporel. Tout ceci fournit de nombreuses informations visuelles à traiter, et implique de nombreux processus : persistance rétinienne, mouvement apparent et effet phi. A cela s'ajoute l'interprétation neurale et émotionnelle.

6. Effet Pikachu

En 1997, après avoir regardé un épisode des aventures de Pikachu, 11 000 adolescents japonais ont été victimes de malaises, 618 ont dû être hospitalisés à la suite de crises de convulsions. En effet une des scènes de l'épisode était constituée d'une succession temporelle de contrastes lumineux et colorés rouges/bleus dit contrastes chaud-froid. Il semblerait que la fréquence était comprise entre 4 et 14 Hz ce qui a déclenché les crises.

Remarque : de nombreuses personnes ignorent qu'elles sont atteintes d'une épilepsie photosensible et risquent de le découvrir à l'occasion d'un jeu vidéo ou d'une émission de télévision. En ce qui concerne les jeux vidéo, justement, les fabricants sont maintenant obligés de faire figurer un avertissement sur les risques de survenue de crises d'épilepsie. Il appartiendrait donc au diffuseur de contrôler lui-même ses programmes. Il semble qu'effectivement, depuis l'accident survenu au Japon, toutes les chaînes vérifient leurs contenus. (105)

ANNEXE 10 Effets du papillotement de lumière

Tableau de l'ANSES présentant les effets constatés liés au scintillement de la lumière des sources artificielles. (44)

| Source de papillotement de lumière | Gamme de Fréquence | Effets Biologiques | Preuves |
|---|--------------------------------------|--|---|
| Lumière du soleil à travers les arbres en bordure de route ou réfléchi par des vagues | Variable | Crises | Histoires cliniques (exemple : Harding et Jeavons, 1994) |
| Photo simulateur à décharge (gaz Xenon) | 3-60Hz | Forme d'épilepsie révélée par EEG pour des patients atteints d'épilepsie photosensible | De nombreuses études cliniques par EEG (Harding et Jeavons, 1994) |
| Dysfonctionnement d'éclairage fluorescent | Composante importante à 50Hz | Forme d'épilepsie révélée par EEG pour des patients atteints d'épilepsie photosensible | (Binnie et al., 1979) |
| Télévision | 50Hz et 60Hz (composante à 25Hz) | Forme d'épilepsie révélée par EEG pour des patients atteints d'épilepsie photosensible | De nombreuses études (Exemple : Harding et Harding, 2008; Funatsuka et al., 2003) |
| Flashes dans les dessins animés | ~10Hz | Crise chez des enfants sans diagnostic antérieur de l'épilepsie | Incident majeur (Okumura et al, 2004) |
| Fonctionnement normal de l'éclairage fluorescent (Ballast de 50Hz) | 100Hz (petite composante de 50Hz) | Maux de tête et la fatigue oculaire | De nombreuses anecdotes. |
| Fonctionnement normal de l'éclairage fluorescent (Ballast de 50Hz) | 100Hz (petite composante de 50Hz) | Maux de tête et la fatigue oculaire | Double-masked study (de Lange Dzn, 1961) |
| Fonctionnement normal de l'éclairage fluorescent (Ballast de 50Hz) | Modulation à 32% | Vitesse réduite de la recherche visuelle | Two masked studies (Jaen et al., 2005; Veitch and McColl, 1995) |
| Fonctionnement normal de l'éclairage fluorescent (Ballast de 60Hz) | 120Hz | Performance visuelle réduite | (Veitch et McColl, 1995) |
| Fonctionnement normal de l'éclairage fluorescent (Ballast de 50Hz) | 100Hz (composante minimale de 50 Hz) | Augmentation du rythme cardiaque chez les personnes agoraphobes | (Hazell et Wilkins, 1990) |
| Fonctionnement normal de l'éclairage fluorescent (Ballast de 50Hz) | 100Hz | Saccades agrandies lors de visualisation de texte | (Wilkins, 1986) |

| | | | |
|--|-----------------------|--|---|
| Bornes à écran de visualisation | Entre 70-110Hz | Changements dans la taille de la saccade | (Kennedy et al.,1998) |
| Bornes à écran de visualisation | Autour d'environ 70Hz | | De nombreux rapports d'anecdotes sur la photophobie prolongée |
| Fonctionnement normal de l'éclairage fluorescent | 100Hz et 120Hz | Enclenchement d'un verrouillage de phase pour les neurons LGN des chats | (Eysel and Burandt, 1984) |
| Variables | Jusqu'à 162Hz | Les signaux des électrorétinogrammes humains sont à la fréquence de lumière | (Berman et al.,1991; Burns et al 1992) |
| Fonctionnement normal de l'éclairage fluorescent (Ballast de 50Hz) | 100Hz | Modifications contradictoires dans les niveaux de corticostérone plasmatiques chez les étourneaux en captivité | (Maddocks et al., 2001) |
| Fonctionnement normal de l'éclairage fluorescent (Ballast de 50Hz) | 100Hz | Choix du partenaire chez les étourneaux en captivité. | (Evans et al., 2006) |

ANNEXE 11 Questionnaire

- 1- Vos Nom et Prénom :
- 2- Votre e-mail :
- 3- Vous êtes : Un homme Une femme
- 4- Quel est votre âge ?
- 5- Quelle est votre nationalité ?
- 6- Quelle est votre métier ?
- Etudiant
 - Employé [secrétaire, vendeur, ...]
 - Ouvrier
 - Profession intermédiaire [travailleur social, infirmier, instituteur,...]
 - Cadre [ingénieur, journaliste,...]
 - Profession intellectuelle supérieure [professeur d'université, profession libérale, médecin, écrivain...]
 - Artisan
 - Commerçant
 - Chef d'entreprise
 - Agriculteur exploitant
 - Retraité
 - Sans emploi
 - Autre [précisez svp]
- 7- De quelle couleur sont vos yeux ?
- Marrons
 - Verts
 - Bleus
 - Autre [précisez svp]
- 8- Avez-vous des problèmes de vue ?
- Oui Non

Si oui, merci de répondre aux questions 9 et 10.

- 9- Quel(s) problème(s) visuel(s) avez-vous ? *

- Problème d'accommodation léger
- Myopie
- Hypermétropie
- Astigmatisme
- Presbytie
- La DMLA [*Dégénérescence Maculaire Liée à l'âge*]
- Cataracte
- Glaucome
- Rétinopathie diabétique
- Rétinopathie pigmentaire
- Daltonisme [*précisez de quel type svp*] :
- Albinisme
- Autre maladie affectant aussi la vision [*précisez svp*]

10- Quelle est votre correction optique ?

- Rééducation visuelle [chez l'orthoptiste]
 - Lunettes
 - Lentilles de contact
 - Opération(s) chirurgicale(s)
- [Précisez la(les) date(s) et le(s) type(s) d'opération(s) svp]
-

* *Vous pouvez cocher plusieurs cases*

ANNEXE 12 Eclairage et température de couleur : Kruithoff

Afin de créer une ambiance procurant une sensation de bien-être, il est important de procéder à un bon choix des sources, ce qui passe donc par des paramètres physiques d'éclairage et d'indice de rendu de couleur. Selon la source, le spectre d'émission est différent, la température de couleur et l'indice de rendu de couleur (IRC) aussi.

Selon les travaux de Kruithoff, il existe une corrélation entre température de couleur, objet illuminé et niveau d'éclairage pour caractériser le niveau de confort de l'ambiance colorée étudiée.

Par exemple, une température de couleur froide nécessite un niveau d'éclairage élevé pour être ressentie comme agréable. Egalement, la perception d'un aliment est généralement plus agréable lorsqu'il est vu sous une couleur chaude plutôt qu'une couleur froide.

Penser également à l'effet Purkinje qui intervient à de faibles niveaux de luminosité.

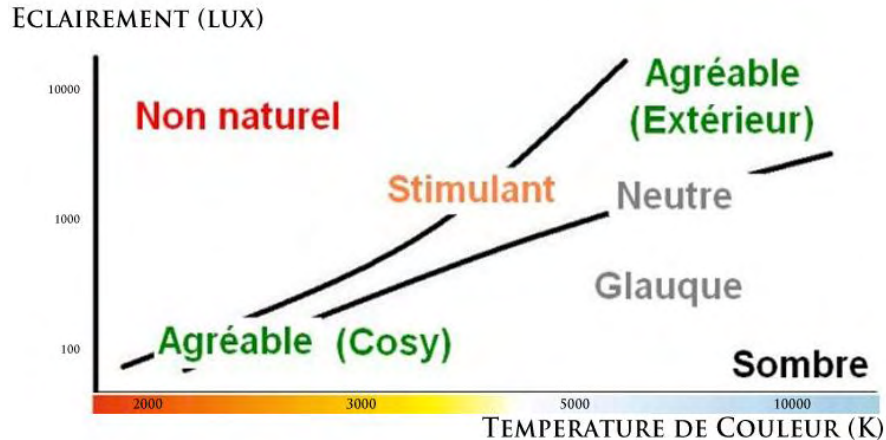


Figure 202 Courbe de Kruithoff : éclairage (lux) en fonction de la température de couleur (K) (106)