



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

Creative commons : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale
- Pas de Modification 4.0 France (CC BY-NC-ND 4.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Université Claude Bernard  Lyon 1

**INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LA
READAPTATION**

Directeur Professeur Jacques LUAUTE

**Efficacité des verres filtrants chez les personnes
atteintes de dyschromatopsies congénitales de type
protan et deutan au test d'Ishihara**

MEMOIRE présenté pour l'obtention du

**CERTIFICAT DE CAPACITE
D'ORTHOPTISTE**

par

MENDOZA Julie et RAYMOND Lydie

Autorisation de reproduction

LYON, le

18/06/2024

Professeur Ph. DENIS
Responsable de l'Enseignement
Mme E. LAGEDAMONT
Directrice des Etudes

N° (du permis d'imprimer)



Université Claude Bernard  Lyon 1

Président
Pr Frédéric FLEURY

Vice-président CFVU
M. CHEVALIER Philippe

Vice-président CA
M. REVEL Didier

Vice-président CS
M. VALLEE Fabrice

Directeur Général des Services
M. ROLLAND Pierre

Secteur Santé

U.F.R. de Médecine Lyon Est
Directeur
Pr. RODE Gilles

U.F.R d'Odontologie
Directeur
Pr. SEUX Dominique

U.F.R de Médecine Lyon-Sud Charles
Mérieux
Directrice
Pr BURILLON Carole

Institut des Sciences Pharmaceutiques
et Biologiques
Directrice
Pr VINCIGUERRA Christine

Département de Formation et Centre
de Recherche en Biologie Humaine
Directeur
Pr SCHOTT Anne-Marie

Institut des Sciences et Techniques de
Réadaptation
Directeur
Pr LUAUTE Jacques

Comité de Coordination des Etudes
Médicales (CCEM)
Pr COCHAT Pierre



Université Claude Bernard



Lyon 1

Secteur Sciences et Technologies

U.F.R. Des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (S.T.A.P.S.)

Directeur

M. VANPOULLE Yannick

Institut des Sciences Financières et d'Assurance (I.S.F.A.)

Directeur

M. LEBOISNE Nicolas

Institut National Supérieur du Professorat et de l'éducation (INSPé)

Directeur

M. CHAREYRON Pierre

UFR de Sciences et Technologies

Directeur

M. ANDRIOLETTI Bruno

POLYTECH LYON

Directeur

Pr PERRIN Emmanuel

IUT LYON 1

Directeur

M. VITON Christophe

Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique de Lyon (ESCPE)

Directeur

M. PIGNAULT Gérard

Observatoire astronomique de Lyon

Directeur

Mme DANIEL Isabelle

Remerciement

Pour la réalisation de ce mémoire nous tenons à remercier :

Madame LAGEDAMONT et Madame PONTON ainsi que tous les autres intervenants de l'équipe pédagogique de la filière Orthoptie de l'ISTR de Lyon, pour leurs enseignements et leur accompagnement durant nos 3 années d'études.

Monsieur le Professeur DENIS, directeur de l'école d'orthoptie et chef du service ophtalmologie de l'hôpital de Croix-Rousse

Monsieur Alexandre PLATTNER, opticien optométriste chez Thierry Caillat, notre maître de mémoire, pour son temps précieux et ses conseils qui nous ont guidés tout au long de notre mémoire.

Nous remercions également la boutique Thierry Caillat pour avoir gracieusement prêté les verres filtrants qui ont été essentiels à notre étude, ainsi que Madame Lagedamont pour le prêt du test d'Ishihara.

Merci à Koptical pour nous avoir permis d'étudier vos produits et pour les informations précieuses fournies sur les verres filtrants.

Nous tenons à remercier tous les participants à l'étude pour leur implication dans la réalisation des tests ainsi que leur temps donné sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible.

Enfin nous remercions nos familles et nos proches pour leur soutien constant pendant la réalisation de ce mémoire et tout au long de ces 3 dernières années.

Table des matières

REMERCIEMENT	2
INTRODUCTION	4
PARTIE 1 : BASES ANATOMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES DE LA VISION DES COULEURS	5
A. BASES ANATOMIQUES DE LA RETINE	5
1. <i>La rétine</i>	5
2. <i>Les photorécepteurs</i>	6
B. BASES PHYSIOLOGIQUES DE LA VISION DES COULEURS	8
1. <i>La phototransduction</i>	8
2. <i>Les cellules bipolaires et les cellules ganglionnaires</i>	8
3. <i>Le corps genouillé latéral</i>	9
4. <i>Traitement dans le cortex visuel primaire</i>	9
PARTIE 2 : LES DYSCHROMATOPSIES CONGENITALES	11
A. PRESENTATION GENERALE DES DYSCHROMATOPSIES	11
B. LA TRANSMISSION GENETIQUE DES DYSCHROMATOPSIES CONGENITALE.....	11
1. <i>Les causes génétiques</i>	11
2. <i>La transmission génétique</i>	13
C. LES DIFFERENTS TYPES DE DYSCHROMATOPSIES CONGENITALES.....	14
1. <i>Les achromatopsies</i>	14
2. <i>Les dichromatopsies</i>	15
3. <i>Les trichromatopsies</i>	16
PARTIE 3 : LES VERRES FILTRANTS	18
A. LA LUMIERE	18
B. FONCTIONNEMENT DES VERRES FILTRANTS	18
C. LES DIFFERENTES MARQUES DE FILTRES	19
PARTIE 4 : TEST DE LA VISION DES COULEURS : LE TEST D'ISHIHARA	22
A. PRESENTATION GENERALE	22
B. DESCRIPTION DES PLANCHES.....	22
C. RESULTATS	24
PARTIE 5 : ETUDE CLINIQUE	26
BIBLIOGRAPHIE	37
TABLES DES ILLUSTRATIONS	40
ANNEXES	41

Introduction

L'œil est l'organe sensorielle de la vision, un sens essentiel pour percevoir le monde extérieur. Les radiations lumineuses captées par les cellules sensorielles visuelles sont traitées par notre système visuel et permettent de donner du sens à notre environnement ; nous discernons ainsi les formes, les tailles et notamment les couleurs, grâce au spectre de la lumière blanche. En effet, ce spectre de lumière blanche est composé d'ondes électromagnétiques de différentes tailles, se réfléchissant sur les objets qui nous entourent et sont ensuite captés par notre œil.

Cependant, certaines pathologies nous empêchent de percevoir partiellement ou totalement les couleurs. Ce sont les dyschromatopsies, couramment appelées le daltonisme. Ces pathologies peuvent être acquises au cours de notre existence ou bien congénitales, c'est-à-dire présentes dès la naissance. Les dyschromatopsies congénitales sont issues d'anomalies génétiques et ne peuvent être traitées à l'heure actuelle.

Contrairement aux dyschromatopsies acquises, les formes congénitales sont présentes dès l'enfance et ne peuvent régresser, entraînant des inégalités scolaires et professionnelles. En effet, certains métiers comme pilote, électricien ou dans le milieu militaire nécessitent une excellente vision et les employeurs se voient dans l'obligation de refuser leur accès aux personnes atteintes de ces maux.

La dyschromatopsie ne peut être soignée, cependant des moyens de compensations optiques sont proposés pour atténuer les conséquences de ce trouble. Des verres de filtrations du spectre de la lumière blanche ont été conçus dans le but d'apporter une amélioration de la perception des couleurs, ce qui est confirmé par plusieurs témoignages. Néanmoins, ces affirmations ne démontrent pas objectivement une réelle amélioration de la perception des couleurs. Notre objectif est donc de prouver l'efficacité des verres filtrants chez les personnes atteintes de dyschromatopsie congénitale de type protan et deutan avec le test d'Ishihara.

Une première partie théorique expliquera d'abord les bases anatomiques et physiologiques de la vision des couleurs. Nous présenterons ensuite les dyschromatopsies congénitales, leur transmission génétique ainsi que leurs différentes formes. Puis nous expliqueront le fonctionnement des verres filtrants, et enfin, nous ferons une présentation générale du test de la vision des couleurs d'ISHIHARA.

Une seconde partie pratique présentera notre étude clinique réalisée grâce à la boutique de Thierry CAILLAT sur une dizaine de personnes.

Avec cette étude nous espérons montrer une différence significative de la perception des couleurs avec les verres filtrants sur un test comme d'ISHIHARA.

Partie 1 : Bases anatomiques et physiologiques de la vision des couleurs

A. Bases anatomiques de la rétine

1. La rétine

L'œil est un organe de forme sphérique, dont la surface interne postérieure est recouverte d'un tissu neurosensoriel, la rétine, qui s'étend du nerf optique jusqu'à l'ora serrata et situé entre la membrane de Bruch de la choroïde et le corps vitrée. La rétine est elle-même composée de plusieurs couches de cellules ; de la plus externe à la plus interne on retrouve :

- L'épithélium pigmentaire,
- Les photorécepteurs, contenant leur segment interne et externe,
- La membrane limitante externe, zone de contact entre les cellules de Müller et les photorécepteurs,
- La couche nucléaire ou granulaire externe, formée des noyaux des photorécepteurs,
- La couche plexiforme ou synaptique interne, où s'établissent les contacts synaptiques entre les photorécepteurs, cellules bipolaires et les cellules horizontales,
- La couche nucléaire ou granulaire interne, contenant le noyau des cellules bipolaires, horizontales, amacrines et de Müller,
- La couche plexiforme ou synaptique interne, où s'établissent les contacts synaptiques entre les cellules bipolaires, ganglionnaires et amacrines,
- La couche des cellules ganglionnaires, contenant le noyau des cellules ganglionnaires,
- La couche des fibres nerveuses optiques, formée des axones des cellules ganglionnaires,
- La membrane limitante interne, formée de la membrane basale de cellules gliales.

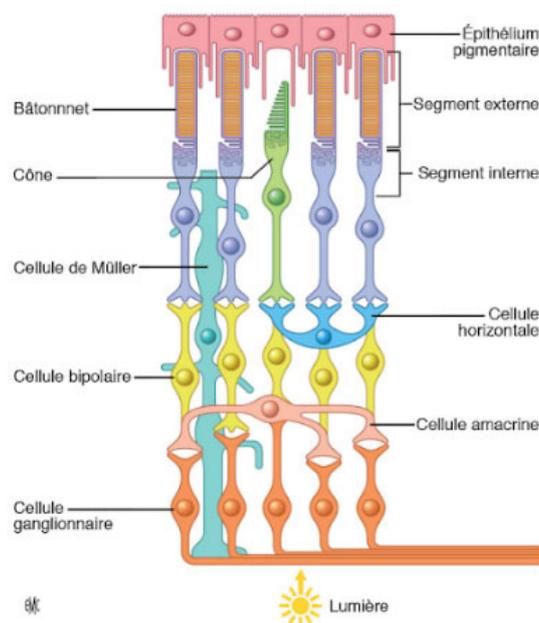


Figure 1 : Schéma des cellules qui composent la rétine [7]

La rétine est partagée en deux zones fonctionnelles, la rétine centrale et périphérique. La rétine périphérique correspond à la zone rétinienne qui s'étend de l'ora serrata jusqu'à la rétine centrale, se situant au niveau du pôle postérieur. La rétine centrale, quant à elle, est elle-même divisée en trois régions : la macula, la fovéa et la fovéola. En effet, en cet endroit, la rétine forme une dépression de cinq millimètres de diamètre, appelée la macula, qui a pour fonction d'absorber la lumière. A l'intérieure de cette dépression se trouve une seconde dépression d'1,5 mm de diamètre, la fovéa, qui est le point rétinien de référence, la région de rencontre entre l'axe optique et la rétine. Enfin, au centre des bords de la dépression que forme la fovéa, entre les 500 µm centraux, se trouve la fovéola, le point rétinien avec la plus haute résolution spatiale c'est-à-dire la zone avec la plus grande capacité de discrimination possible, ce qui correspond tout simplement à la meilleure acuité visuelle. Cela est rendue possible grâce à la présence d'une très grande concentration d'un des deux types de photorécepteurs : les cônes. Puisqu'en effet, au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la fovéa, la concentration de cônes diminue et inversement, plus la concentration des bâtonnets, le deuxième type de photorécepteurs, augmente. Ces photorécepteurs sont tous les deux les cellules neuro-sensorielles de la rétine mais ils ne partagent ni les mêmes caractéristiques, ni les mêmes propriétés.

2. Les photorécepteurs

Tout d'abord, les photorécepteurs sont composés de trois structures : les segments externe, interne et leur axone. Le segment externe des cônes a une forme conique, et est constitué d'un empilement des disques (dont la membrane est en continuité avec la membrane des cônes) remplis de photopigments. Les photopigments sont des molécules synthétisées par le segment interne et absorbent l'énergie des photons, transportés par les longueurs d'onde. Chaque type de cônes présente une absorption maximale des longueurs d'ondes. En effet, il existe trois types de cônes, qui sont les cônes bleus (aussi appelé S) qui absorbent au maximum des longueurs d'onde jusqu'à 415 à 430 nanomètres. Ces cônes représentent environ 5% des cônes rétiniens. Les cônes verts (aussi appelé M) absorbent au maximum des longueurs d'onde jusqu'à 530 à 537 nm et représentent environ 32% des cônes rétiniens ; Les cônes rouges (aussi appelé L) absorbe au maximum des longueur d'onde jusqu'à 555 à 565 nanomètres et représentent environ 63% des cônes rétiniens. On retrouve 6 millions de cônes au sein de la rétine, dont 200 000 par millimètre carré au niveau de la fovéa et 3 000 par millimètre carré au niveau de la rétine périphérique. Les cônes sont donc les seuls photorécepteurs impliqués dans le traitement des détails fins de notre environnement, des couleurs, mais sont aussi responsable de la vision diurne, c'est-à-dire photopique, les cônes ne s'activent qu'avec une grande quantité de lumière.

Les bâtonnets sont des photorécepteurs de forme cylindrique et possèdent également dans leur segment externe des photopigments, capables d'absorber au maximum des longueurs d'ondes de 496 nanomètres (les membranes des disques contenant la rhodopsine est indépendante de la membrane de la cellule). On retrouve 100 millions de bâtonnets au sein de la rétine, dont 150 000 par millimètre carré aux 20 degrés autour de la fovéa et 100 000 par millimètre carré en périphérie. Contrairement aux cônes, il n'existe qu'un seul type de bâtonnet, donnant une image en noir et blanc, et ne s'activant seulement en ambiance scotopique, c'est-à-dire avec une faible luminosité, permettant ainsi la vision nocturne.

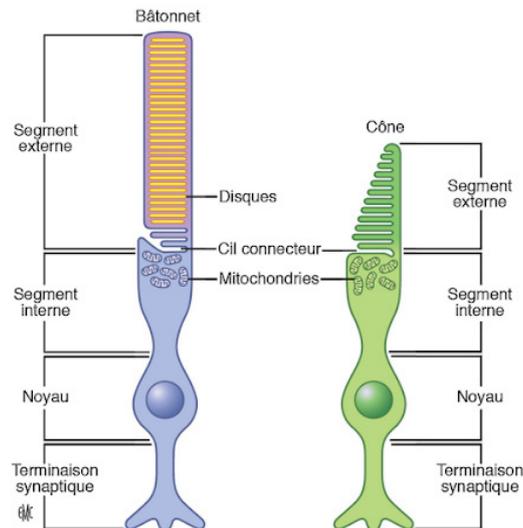


Figure 2 : Schéma d'un bâtonnet (à gauche) et d'un cône (à droite). [7]

Néanmoins, on retrouve un point commun entre les photopigments des deux photorécepteurs. En effet, les photopigments des deux photorécepteurs sont composés de deux molécules, le rétinal, une vitamine A, capable d'absorber l'énergie des photons, et une glycoprotéine, l'opsine. Les bâtonnets contiennent l'opsine nommée rhodopsine, et les cônes contiennent l'opsine de la iodopsine, qui se décline en trois formes et détermine ainsi le type de cône S, L ou M. L'ensemble rétinal-opsine des photopigments permettent l'absorption de la lumière pour la convertir en un signal nerveux. Ce mécanisme est appelé la phototransduction.

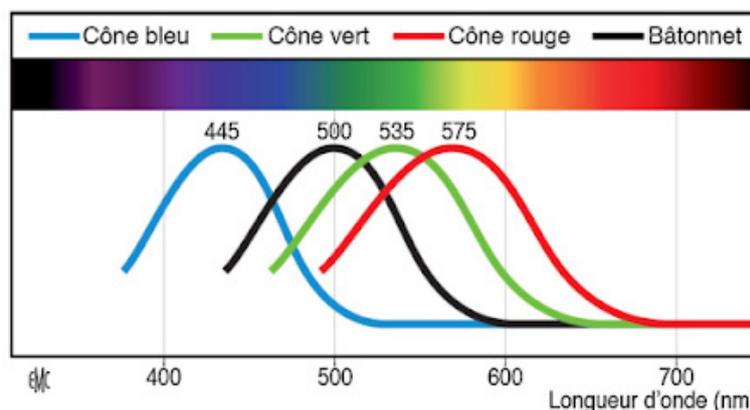


Figure 3 : Schéma d'absorption de la iodopsine des cônes et de la rhodopsine des bâtonnets. [7]

B. Bases physiologiques de la vision des couleurs

1. La phototransduction

L'absorption des photons par les photopigments entraîne une hyperpolarisation des cônes, En temps normal, c'est-à-dire à l'obscurité, la dépolarisation des cônes est maintenue par un échange équilibré entre un afflux d'ions sodium et un efflux de glutamate (un neurotransmetteur) par des canaux présents dans la membrane plasmique des photorécepteurs. Seulement, à lumière, les canaux ne libèrent plus le glutamate, entraînant un déséquilibre et donc une hyperpolarisation des cônes.

2. Les cellules bipolaires et les cellules ganglionnaires

Les cônes forment ensuite un contact synaptique avec des cellules bipolaires. Les cellules bipolaires peuvent être catégorisées en fonction de leur arborisation dendritique. Les cellules bipolaires naines possèdent une petite arborisation dendritique tandis que les cellules bipolaires diffuses ont une arborisation dendritique importante. De plus, il existe deux types de fonctionnement de ces cellules bipolaires, en mode ON et OFF. Les cônes L et M sont liés aux cellules bipolaires naines et diffuses en mode ON et OFF et les cônes S sont liés uniquement à des cellules bipolaires spécifiques en mode ON. On les appelle les cellules bipolaires "à cônes bleus". Ainsi, l'hyperpolarisation des trois types de cônes à la lumière entraîne une dépolarisation des cellules bipolaires en mode ON et une hyperpolarisation des cellules bipolaires en mode OFF. À l'inverse, quand les cônes sont dépolarisés à l'obscurité, on observe une hyperpolarisation de la cellule bipolaire en mode ON et une dépolarisation de la cellule bipolaire en mode OFF.

Les axones des cellules bipolaires établissent enfin des contacts synaptiques avec les cellules ganglionnaires. Il en existe trois types, dont chacune est reliée à une cellule bipolaire spécifique. Chaque cellule bipolaire naine est en contact avec une cellule ganglionnaire naine, les cellules bipolaires diffuses sont reliées aux cellules ganglionnaires parasol et les cellules ganglionnaires bistratifiées sont liées aux cellules bipolaires "à cônes bleus". De plus, comme les cellules bipolaires, les cellules ganglionnaires fonctionnent avec un mode ON et OFF. Ainsi, les cellules bipolaires ON transmettent l'information aux cellules ganglionnaires ON et les cellules bipolaires OFF transmettent l'information aux cellules ganglionnaires OFF. Les cellules ganglionnaires produisent enfin des potentiels d'action qui se propagent le long de leur axone. Le nerf optique, formé de l'ensemble des axones des cellules ganglionnaires, transmet donc l'information nerveuse jusqu'au thalamus, où se trouvent les corps genouillés latéraux.

3. Le corps genouillé latéral

Le corps genouillé latéral est un noyau situé dans chaque hémisphère et composé de six couches de corps cellulaires de neurones. Les couches 1, 4 et 6 reçoivent des informations visuelles issues de l'œil controlatéral et les couches 2, 3 et 5 reçoivent les informations de l'œil ipsilatéral. De plus, les couches 1 à 2, les plus ventrales, sont composées de cellules de grande taille et forment les couches magnocellulaires, où sont projetés les axones des cellules ganglionnaires parasols. Les couches 3 à 6, les plus dorsales, sont composées de cellules de petite taille, et forment les couches parvocellulaires, où sont projetés les axones des cellules ganglionnaires naines. Il existe également une troisième couche, appelée koniocellulaires, composée de cellules encore plus petites, se situant entre les six couches intercalées, où sont projetés les axones des cellules ganglionnaires bistratifiés. En résumé, la couche ou voie magnocellulaire est liée aux cônes M et L, aux cellules bipolaires diffuses et aux cellules ganglionnaires parasols, la couche ou voie parvocellulaires est aussi liée aux cônes M et L, aux cellules bipolaires naines, et aux cellules ganglionnaires naines et enfin, la couche ou voie koniocellulaire est liée aux cônes S, aux cellules bipolaires "à cônes bleus" et aux cellules ganglionnaires bistratifiés.

Les axones poursuivent ensuite leur chemin en formant les radiations optiques, puis se projettent enfin dans la région du cortex visuel primaire, notamment par les voies magnocellulaire et parvocellulaire.

4. Traitement dans le cortex visuel primaire

Le cortex visuel primaire, aussi appelé cortex strié (ou V1), se localise dans les lobes occipitaux. L'information visuelle est d'abord traitée par l'aire primaire V1, puis par l'aire pré-striée V2, et va ensuite être transmise à d'autres aires extra-striées ou aires associatives visuelles (V3, V4 et V5), dans lesquelles sont traitées les différentes propriétés de l'information visuelle. L'aire extra-striée V4 traite notamment l'information de la couleur. L'aire V4 fait partie de la voie ventrale ou occipito-temporale, impliquée dans le traitement de la vision des formes, de la texture, des couleurs, et de la reconnaissance des objets. Cette voie comprend aussi les aires V1, V2 et V3.

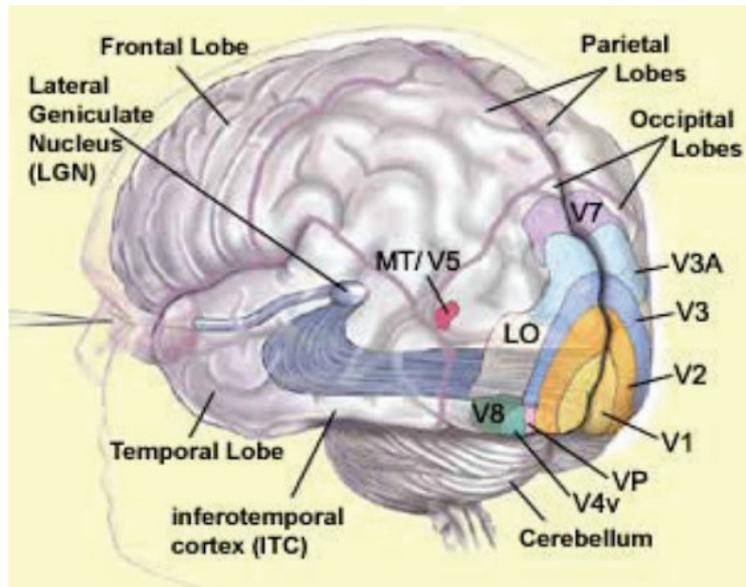


Figure 4 : Schéma des zones cérébrales ; les zones colorées sont impliquées dans le traitement des informations visuelles. [9]

Partie 2 : Les dyschromatopsies congénitales

A. Présentation générale des dyschromatopsies

Chez l'Homme, la vision des couleurs est dite trichromatique, puisque d'après la théorie de Young-Helmholtz-Maxwell [30], la vision des couleurs repose sur la présence des trois types de cônes L, M et S. Ces cônes sont sensibles à des longueurs d'ondes qui se chevauchent, mais chacun présente un pic d'absorption des longueurs d'ondes différentes, amenant donc des réponses différentes. Les cônes ont ainsi des préférences à des longueurs d'onde qui correspondent aux couleurs rouges, vertes et bleues. Le dysfonctionnement ou l'absence d'un de ces trois photorécepteurs entraîne des anomalies de la vision des couleurs, c'est-à-dire des dyschromatopsies, pouvant être congénitales ou acquises. La perception des couleurs est alors imparfaite, ou totalement absente. Les dyschromatopsies acquises sont des troubles de la vision des couleurs secondaires à des pathologies oculaires, notamment de la rétine et du nerf optique, c'est-à-dire des voies optiques en général. De plus, les dyschromatopsies acquises sont évolutives, suivant ainsi le développement de la maladie causale, et peuvent aussi être asymétriques. En effet, si l'atteinte est unilatérale, alors la dyschromatopsie acquise l'est aussi. Ce type d'affection peut être conscient, la modification de la perception des couleurs peut être perçue par le sujet.

Les dyschromatopsies congénitales, aussi appelées daltonisme, sont des troubles héréditaires, présents dès la naissance et sont le résultat d'altérations génétiques des cônes. Contrairement aux formes acquises, les dyschromatopsies congénitales sont des atteintes bilatérales symétriques, c'est-à-dire présentes sur les deux yeux, non évolutives et inconscientes. Les hommes sont essentiellement touchés, avec une fréquence moyenne de 7 à 8% contre seulement 0,4% chez les femmes [1]. Cette fréquence particulière de ce trouble observée chez la population masculine est notamment expliquée par la transmission génétique des dyschromatopsies congénitales.

B. La transmission génétique des dyschromatopsies congénitale

1. Les causes génétiques

Les dyschromatopsies congénitales sont issues d'anomalies génétiques d'un gène codant pour les photopigments des cônes, la iodopsine. Il existe trois versions de ce gène, qui codent pour trois protéines différentes, donnant donc trois différents pigments, un pigment rouge pour les cônes L, un pigment vert pour les cônes M, et un pigment bleu pour les cônes S. Néanmoins, ces gènes se situent à des endroits différents. Les gènes codant pour les pigments vert et rouge se localisent sur le gonosome ou chromosome sexuel X, tandis que le gène codant pour le pigment bleu se situe sur l'autosome ou chromosome n°7. Ces anomalies génétiques entraînent donc un dysfonctionnement ou une absence totale des cônes, que ce soit L, M ou S en fonction de la localisation des anomalies.

Durant la méiose, les chances d'accidents génétiques des gènes codant pour les pigments vert et rouge sont beaucoup plus importantes, expliquant donc une plus grande fréquence des anomalies « rouge/ verte ». On évoque des anomalies de type "protan" lors d'atteinte des cônes L, "deutan" lors d'atteinte des cônes M et "tritan" lors d'atteinte des cônes S.

La méiose est un processus de fabrication des gamètes, composé d'une double division cellulaire successive, menant à l'obtention de quatre cellules haploïdes, qui contiennent chacune la moitié des chromosomes de la cellule diploïde initiale. C'est durant ce phénomène que se produisent des accidents pouvant donner lieu à dyschromatopsies congénitales d'anomalies "rouge/ verte", car leurs gènes sont situés sur le même chromosome. En effet, durant ces divisions, des enjambements entre chromosomes peuvent se créer, entraînant un échange de portion entre chromosome. Ce phénomène est appelé crossing-over. Les zones de jonctions entre chromosomes sont appelées des chiasmas. Lors de la première division, séparant une paire de chromosome diploïde, un échange de portion de chromatide au niveau du chiasma peut être observé, c'est un phénomène de brassage ou recombinaison intragénique. Ainsi, à la fin de la méiose, un chromosome sexuel sur quatre ne présentera qu'un seul gène codant les photopigments, L ou M, tandis qu'un autre chromosome sur quatre présentera le gène en double. Le premier chromosome sera pathologique, entraînant donc une anomalie de la vision des couleurs, alors que le second sera sain : c'est un brassage ou recombinaison intergénique, un autre phénomène qui permet une distribution aléatoire des chromosomes au sein des gamètes. Ce phénomène est surtout observé chez les dichromates.

Un autre type d'accidents génétiques peut être observé, créant un dysfonctionnement des pigments des cônes. En effet, le crossing-over peut avoir lieu au sein même des gènes codant les photopigments, une partie du gène codant le pigment des cônes M est transférée dans le gène codant le pigment des cônes L, et inversement, entraînant un changement au sein des séquences d'acides aminés. Des gènes hybrides sont ainsi créés, modifiant le spectre d'absorption des cônes. Ce phénomène est surtout observé chez les trichromates anormaux d'anomalie "rouge/ verte". Les sujets présentent les 3 types de cônes, mais l'un d'eux est altéré ; ils voient les mêmes couleurs que les sujets normaux, mais de manière différente.

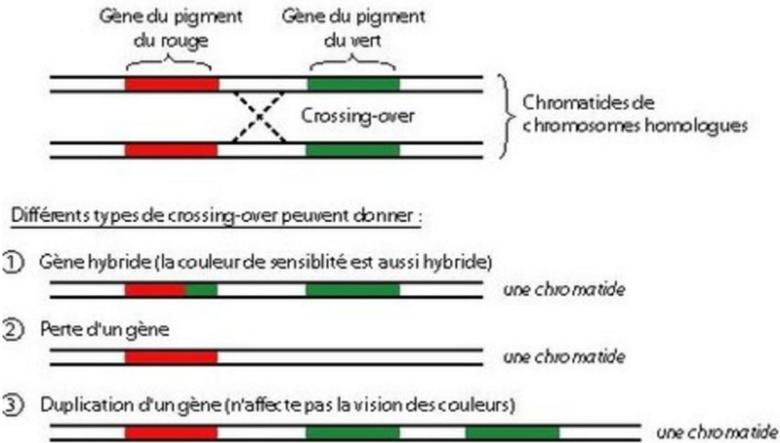


Figure 5 : Schémas des différents résultats observés après le crossing over

2. La transmission génétique

Comme énoncé précédemment, les dyschromatopsies congénitales avec une anomalie de type protan et deutan sont majoritairement observées chez l'homme. En effet, les gènes codant pour les photopigments L, et M sont dits "récessifs", c'est-à-dire que ces gènes doivent être absents ou dysfonctionnant sur les deux chromosomes d'une paire pour que pathologie puisse s'exprimer. Une femme, définie par la présence de deux gonosomes ou chromosomes sexuels X, qui ne possède aucun de ces gènes sur ses deux chromosomes sexuels X, sera daltonienne. Dans ce cas-là, la femme a reçu un chromosome X défaillant de part de son père (daltonien) et un autre chromosome X défaillant de part de sa mère (porteuse saine). Cela reste malgré tout un cas très rare. Cependant, une femme qui ne présente qu'un seul chromosomes X atteint, c'est-à-dire ne portant pas un des gènes, sera qualifiée de porteuse saine. En effet, le chromosome sain compensera celui atteint, elle ne présentera pas de symptômes, elle sera porteuse de l'atteinte et pourra la transmettre à sa descendance. Comme les hommes sont définis par la présence de deux gonosomes ou chromosomes sexuels différents, X et Y, si le gonosome X ne présente pas un des gènes codant un des photopigments, ce chromosomes X ne pourra pas être compensé par un autre chromosomes X, cet homme développera donc un trouble de la vision des couleurs de type "rouge/ verte", c'est-à-dire protan et deutan.

Dans le cas des dyschromatopsies congénitales de type "bleue", on évoque une atteinte autosomique récessive, tandis que pour les dyschromatopsies congénitales de type "rouge/ verte", on parle d'une atteinte gonosomique récessive.

C. Les différents types de dyschromatopsies congénitales

1. Les achromatopsies

L'achromatopsie est en général caractérisée par l'absence plus ou moins totale des trois cônes, amenant à une abolition de la vision photopique, la vision est assurée par les bâtonnets. Le sujet perçoit les couleurs en noir et blanc, avec une simple sensation de luminosité. Il existe deux formes d'achromatopsies, qui sont l'achromatopsie typique ou complète, et l'achromatopsie atypique ou incomplète.

L'achromatopsie typique ou achromatopsie complète typique est une absence de la vision des couleurs par la présence des trois cônes M, L et S non fonctionnels, comme cité ci-dessus, avec lequel s'associe une amblyopie ou une mauvaise acuité visuelle, une photophobie, et un nystagmus pendulaire. Le mode de transmission de l'achromatopsie complète typique est dit autosomique récessive, car l'atteint se situe sur les autosomes ou chromosomes n°2 et n°8, qui entraîne un dysfonctionnement de phototransduction des cônes. Cette atteinte est due à des mutations de cinq gènes qui se situent majoritairement sur les chromosomes n°2 et n°8 (CNGA3, CNG83, GNAT2, PDE6C, et PDE6H) et nécessaire au bon fonctionnement de la phototransduction des cônes. Cette affection reste malgré tout très rare, en effet, sa fréquence est de 0,00033 %.

L'achromatopsie atypique ou incomplète se divise elle-même en trois catégories : achromatopsie atypique avec amblyopie, avec vision satisfaisante et avec amblyopie relative.

L'achromatopsie atypique avec amblyopie est une absence plus ou moins totale de la vision des couleurs entraînée par la présence de deux cônes non fonctionnels. On parle de monochromie, la vision des couleurs est assurée par un seul et unique type de cônes fonctionnel, il existe ainsi trois formes de monochromatisme en fonction du cône restant. Les monochromatismes à cônes L (seuls les cônes L sont fonctionnels) et à cônes M (seuls les cônes M sont fonctionnels) ont un mode de transmission gonosomique récessive, tandis que les monochromatismes à cônes S (seuls les cônes L sont fonctionnels) ont un mode de transmission autosomique récessive.

L'achromatopsie atypique avec vision satisfaisante se caractérise par une absence totale ou partielle de la discrimination des couleurs, mais conserve malgré tout une acuité visuelle normale. C'est un cas très rare, son mode de transmission est donc difficile à définir.

L'achromatopsie atypique avec amblyopie relative se caractérise par une absence partielle de la discrimination des couleurs, ainsi qu'une mauvaise acuité visuelle, plus ou moins correcte, expliquée par une déficience partielle des cônes.

2. Les dichromatopsies

La dichromatopsie se définit par l'absence d'un type de gène codant pour les photopigments, au sein des cônes, il n'y a donc que deux types de cônes fonctionnels. Selon le pigment absent, on retrouve trois formes de dichromatismes : la protanopie, la deutéranopie et la tritanopie. Chaque forme de dichromatopsie possède une région dans leur spectre chromatique que les sujets perçoivent grisâtre, ils n'ont aucune discrimination chromatique pour certaines tonalités, c'est-à-dire pour certaines longueurs d'ondes. Cette région dans le spectre chromatique est appelée la zone neutre. Cette forme de dyschromatopsie représente 25% des dyschromatopsies congénitales

La protanopie se caractérise par une absence du gène des pigments des cônes L, le rouge n'est pas perçu. Ce type d'atteinte entraîne une confusion du rouge et du bleu-vert, ainsi que toutes sortes de nuances de rouge. Sa zone neutre se situe vers des longueurs d'ondes de 492 nm, soit dans le bleu-vert, limitant ainsi son spectre chromatique entre des longueurs d'ondes correspondants au bleu et au jaune. Les longueurs d'onde au-delà de 650 nm ne sont plus perçues. Sa fréquence est d'environ 1% sur l'ensemble des dyschromatopsies congénitales.

Le deutéranopie se caractérise par une absence des pigments des cônes M, le vert n'est pas perçu. Cette atteinte entraîne une confusion du rouge-orangé et du bleu-vert et toutes les nuances de vert. Sa zone neutre se situe vers des longueurs d'ondes de 498 nm, soit dans le bleu-vert, limitant son spectre chromatique entre des longueurs d'ondes correspondants au bleu et au jaune. Son spectre chromatique se rapproche beaucoup du protanope. Elle représente environ 1,4% des dyschromatopsies congénitales.

La tritanopie se caractérise par une absence des pigments des cônes S, liés à des mutations sur le chromosome n°7, le bleu n'est donc pas perçu. Cette atteinte entraîne une confusion du jaune-vert, du violet, du vert, ainsi que toutes les nuances de bleu, qu'ils perçoivent gris, gris-turquoise et rouge bordeaux. Sa zone neutre se situe dans le jaune-vert, et violet, limitant son spectre chromatique entre des longueurs d'ondes correspondants au bleu-vert et au rouge vermillon-orangé. Au sein des dichromatopsies, seule la tritanopie se caractérise comme une atteinte autosomique récessive. Sa fréquence au sein des dyschromatopsies congénitales est très rare, elle représente 0,001% des dyschromates.

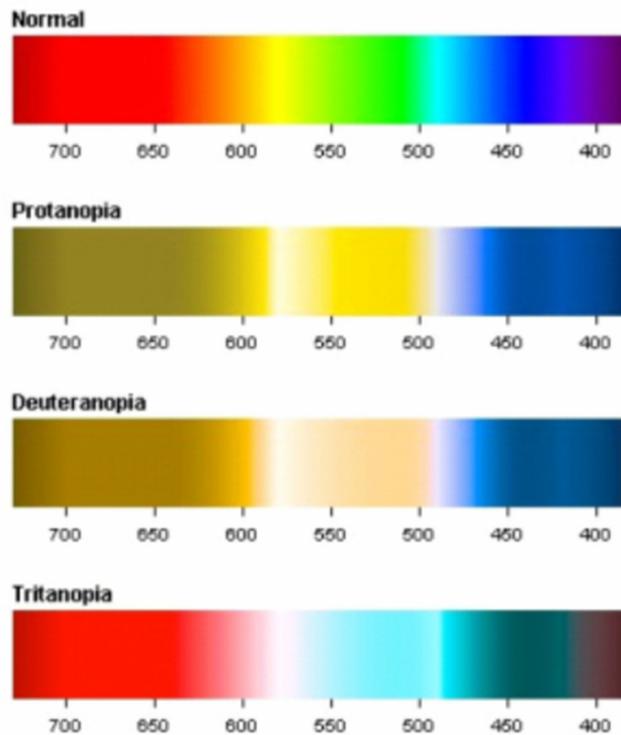


Figure 6 : Spectre chromatiques des différentes formes de dyschromatopsies

3. Les trichromatopsies

La trichromatopsies est aussi appelée trichromatisme anormale. En effet, comme expliqué antérieurement, le trichromatisme est issu de gènes hybrides qui entraîne une altération d'un des pigments d'un type de cône. Ainsi, les trichromates anormaux présentent les 3 types de cônes, dont l'un d'eux dysfonctionne. L'un des cônes défectueux ont une courbe de sensibilité spectrale différente des sujets normaux. Ces sujets perçoivent les mêmes couleurs que les sujets normaux, mais avec une sensibilité différente, et passent donc facilement inaperçus au quotidien. Ce type d'atteinte représente 70% des dyschromatopsies congénitales. Il existe trois formes de trichromatopsies, la protanomalie, la deutéranomalie et la tritanomalie, chacune définit par le type de cône qui est altéré.

La protanomalie se définit par un déficit du photopigment des cônes L, entraînant une altération de la perception du rouge. Les cônes L, capables d'absorber au maximum des longueurs d'ondes jusqu'à 560 nm, chez le sujet sain, ne pourra qu'absorber des longueurs d'ondes maximales jusqu'à 545 nm, voire 535 nm. Le rouge est perçu brun-orangé. Sa fréquence est d'environ 1% des dyschromatopsies congénitales.

La deutéranomalie se définit par un déficit du pigment des cônes M, entraînant une altération de la perception du vert. Les cônes M, capables d'absorber au maximum des longueurs d'ondes jusqu'à 530 nm, chez le sujet sain, ne pourra qu'absorber des longueurs d'ondes maximales jusqu'à 545, voire 555 nm. Son spectre chromatique est plus ou moins identique au sujet trichromate, mais le vert est perçu plus pâle. Sa fréquence est de 4,6%, c'est la forme la plus fréquente de dyschromatopsies congénitales

La tritanomalie se définit par un déficit du pigment des cônes S, entraînant une altération de la perception du bleu. Comme la tritanopie, la tritanomalie est issue de mutations sur le gène codant le pigment des cônes S. Cette anomalie se transmet également avec un mode autosomique récessif et elle représente 0,001% des dyschromates. Il est cependant difficile de la différencier avec une tritanopie. Certaines études évoqueraient la tritanomalie comme étant une tritanopie incomplète. [5]

Partie 3 : Les verres filtrants

Les verres filtrants ont pour but d'augmenter les contrastes et de diminuer les symptômes du daltonisme, ils ne permettent pas de le guérir. Il existe différentes marques sur le marché qui se sont perfectionnées au fil des années.

A. La lumière

La lumière est une énergie électromagnétique perçue par l'œil humain. La lumière fait partie du spectre électromagnétique qui englobe toutes les longueurs d'ondes allant des rayons gammas aux ondes radio. La lumière visible se situe environ entre 400 nm et 700 nm, entre les ultraviolets et les ondes infrarouges. Le spectre visible est continu, il n'y a pas de séparation nette entre les couleurs, cependant on admet généralement que chaque couleur correspond à une longueur d'onde particulière allant du violet au rouge en passant par le bleu, le vert, le jaune et l'orange.

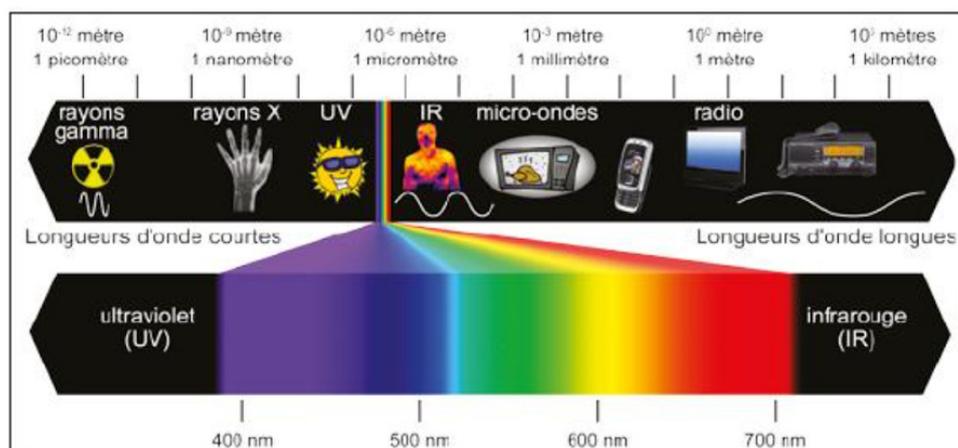


Figure 7: Le spectre électromagnétique : le spectre de la lumière blanche détaillé. [27]

B. Fonctionnement des verres filtrants

Le principe repose sur la filtration des longueurs d'ondes du spectre de la lumière visible. En effet, il existe différentes teintes de filtres, et chaque teinte filtre une longueur d'onde différente et une quantité de lumière différente pour créer différents contrastes et s'adapter au type et au niveau de daltonisme. De plus, le choix de ses verres sont purement subjectifs, c'est le patient qui choisit quel type de verre lui convient le mieux.

En effet, chez les dyschromates congénitaux de type protan et deutan, les longueurs d'ondes absorbées par les cônes M et L se chevauchent. Les verres filtrent donc les longueurs d'ondes confuse du spectre lumineux afin de séparer les deux pics d'absorption et atténuer la ligne de confusion pour augmenter les contrastes. La filtration d'une partie des longueurs d'ondes du spectre lumineux entraîne donc une modification de la perception des couleurs : certaines difficilement perçues vont le devenir, et d'autres, à l'inverse, vont être moins bien distinguables qu'à l'ordinaire. Ce phénomène s'amplifie par la couleur des teintes que prennent ces verres filtrants.

Il existe des filtres pour un usage en extérieur, filtrant une plus grande quantité de lumière, par rapport aux filtres d'intérieurs. Le sujet choisit un filtre selon ses préférences et son confort. Ce type de filtre peut cependant apporter de l'inconfort lors de changement de condition lumineuse. En effet, si le sujet porte en continu les verres filtrants, il est habitué à percevoir une quantité limitée de lumière, non absorbée par les filtres. Et une fois que la personne enlève ses lunettes teintées, elle risque d'être beaucoup gênée par la lumière. Les filtres peuvent donc créer une photophobie chez le sujet qui porte les filtres en permanence. Il est donc conseillé, soit de porter deux paires de lunettes avec une teinte pour l'intérieur et une autre teinte pour l'extérieur, soit d'utiliser les filtres uniquement pour des activités où une bonne vision des couleurs est nécessaire ; peinture, retouche photo, chimie, et tout autres activités où le patient estime en avoir besoin. La conduite n'est néanmoins absolument pas recommandée avec ces verres filtrants.

Les verres filtrants peuvent être adaptés à la correction optique du patient, même sur des verres progressifs.

C. Les différentes marques de filtres

Sur le marché, il existe différents types de filtre développé par différentes entreprises. Le leader sur le marché est la société EnChroma, basée aux Etats-Unis. Les fondateurs d'EnChroma sont les premiers à avoir inventé les lentilles filtrantes pour sujets atteints de troubles de la vision des couleurs, en 2012. Depuis, d'autres entreprises ont repris cette technologie, pour la proposer et la commercialiser à l'étranger, notamment en France, où l'on retrouve les sociétés Koptical, ou encore Lesa.

L'entreprise Koptical a créé une marque de verres filtrants, nommée Kolorblind, qui reprend le même principe que la technologie de filtres élaborés par EnChroma. L'entreprise a été nommée au Silmo d'Or 2021. Ce fournisseur propose deux teintes de verres Kolorblind, qui sont le KP Rose Miroir, surtout proposé aux atteintes de type protan, et le KD Violet Miroir, orienté plutôt pour les atteintes de type deutan.

Une autre société française, Lesa, propose quant à elle, les verres Color X disponibles en quatre teintes, allant du rouge au pourpre, qui se déclinent eux-mêmes en plusieurs teintes avec un taux de transmission de la lumière variable par rapport aux quatre filtres de références. Ces verres sont conçus pour l'intérieur et l'extérieur, et ils proposent également des verres filtrants pour une utilisation à l'extérieur.



Figure 8 : Verres filtrants Kolorblind de la marque Koptical

Dans notre mémoire, nous avons choisi d'étudier les verres de la gamme Kolorblind de chez Koptical. L'entreprise propose des verres avec une coloration, ainsi qu'un miroir spécial en fonction des symptômes des deux types de dyschromatopsies congénitales les plus fréquentes, qui sont les anomalies de type protan et deutan.

Il existe donc deux teintes de verres mis à disposition dans la gamme Kolorblind : le KP Rose Miroir proposé pour le sujet atteint d'une anomalie de type protan et le KD Violet Miroir proposé pour le sujet atteint d'une anomalie de type deutan [Figure 8]. Ces verres sont personnalisés en fonction du défaut optique du patient. On retrouve également d'autres caractéristiques au sein des verres comme une protection UV absorbant 100% les UVA et UVB [Figure 9 et 10], ainsi qu'un traitement Anti-Reflets, liés à l'effet miroir que les verres subissent. Les verres filtrants sont fabriqués à partir d'un traitement Durci pour résister aux rayures.

Les verres KD et KP présentent des spectres de transmission très similaires [Figure 9 et 10]. On observe un premier pic de transmission aux environs de 400 nm, correspondant à la couleur violette, à 25 % pour les verres KP et plus élevé pour les verres KD, approchant les 50 %. Le deuxième pic de transmission débute vers 580 nm, correspondant au jaune, et s'étend jusqu'à la fin du spectre visible, environ 800 nm, associé à la couleur rouge. Cependant, ce deuxième pic de transmission est plus prononcé sur le verre KP. Les verres absorbent donc une partie de la lumière violette, qui n'est pas transmise. Ils absorbent également une grande quantité de lumière bleue et verte, correspondant au creux entre 480 et 580 nm.

Les verres KP et KD absorbent donc les mêmes longueurs d'onde, mais à des pourcentages différents. Cela permet de s'adapter à chaque type de daltonisme, ainsi qu'aux besoins spécifiques des patients.

Étant donné que le verre KD transmet davantage la lumière violette, il présente une teinte plus violette, tandis que le verre KP, qui transmet davantage la couleur rouge, aura une teinte plus rosée.

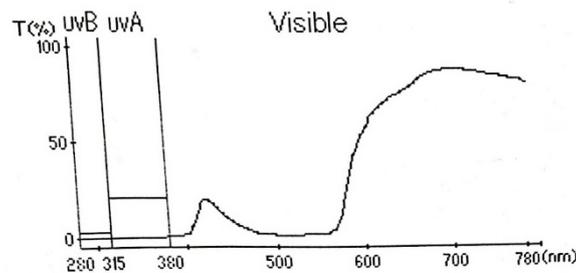


Figure 9 : Spectre de transmission de la lumière UV et visible des verres KP Rose miroir (appareil utilisé : Solos de Topcon)

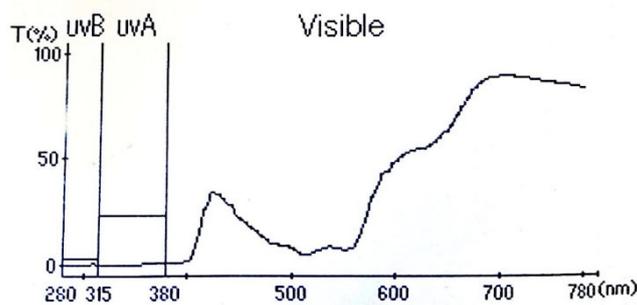


Figure 10 : Spectre de transmission des verres de la lumière UV et visible KD Violet miroir (appareil utilisé : Solos de Topcon)

Partie 4 : Test de la vision des couleurs : Le test d'ISHIHARA

A. Présentation générale

Il existe différents tests pour évaluer la vision des couleurs. Certains tests sont utilisés pour les anomalies congénitales et d'autres pour les anomalies acquises. Certains sont spécialisés dans le dépistage comme le test d'Ishihara et d'autres sont plus précis pour déterminer l'axe comme les tests de Farnsworth.

Dans notre mémoire nous nous intéressons au test d'Ishihara. En effet le test d'Ishihara est le plus couramment utilisé en dépistage du trouble des visions des couleurs, il est universel.

Le test d'Ishihara a été inventé en 1971 par Shinobu ISHIHARA, professeur à l'université de Tokyo. C'est un test pseudo-isochromatique, c'est-à-dire qu'il est composé de différentes planches faites de pastilles colorées de différentes tailles qui forment un motif d'une couleur se détachant du fond d'une autre couleur.

Ce test se présente sous la forme d'un album facile à manipuler, simple et rapide d'utilisation. Il est accompagné d'une notice explicative et d'une feuille qui nous permet de connaître la pathologie du patient suivant ses réponses. Il n'exige pas une acuité visuelle élevée car 1/10 suffit.

B. Description des planches

L'album d'Ishihara est composé de 38 planches avec des chiffres en première partie de l'album (planches 1 à 25) et des chemins en seconde partie (planches 26 à 38). On utilise les chemins chez les patients non verbaux et les enfants.

Pour la première partie, le sujet doit dire les chiffres qu'il voit.

Pour la seconde partie, on prend le livret à l'envers, c'est-à-dire qu'on commence par la fin et on enchaîne ensuite les planches. Ici le sujet doit suivre le chemin, s'il en voit un avec son doigt.

On distingue plusieurs types de planches :

- ❖ 2 planches de démonstration (chiffres : planche n° 1, chemins : planche n° 38) : lues par le sujet normal et anormal. Elles sont composées de pastilles orange sur fond de pastilles bleu-vert.
- ❖ 12 planches de confusion (chiffres : planches n° 2 à 9, chemins : planches n° 34 à 37) : lues différemment par le sujet normal et anormal. Elles sont divisées en 2 types de planche :
 - Les premières sont composées d'un mélange de pastilles pourpres, oranges, et bleu-vert sur un fond de pastilles verte-jaune.
 - Les autres sont composées d'un mélange de pastilles pourpres, vert-jaune, et bleu-vert sur un fond de pastilles orange.

- ❖ 12 planches d'épreuve (chiffres : planches n° 10 à 17, chemins : planches n° 30 à 33) : lues par le sujet normal et non lues par le sujet pathologique. Elles sont divisées en 2 types de planche :
 - Les premières sont composées d'un mélange de pastilles vertes sur un fond de pastilles orange et rouges.
 - Les autres sont composées d'un mélange de pastilles marron sur un fond de pastilles bleu-vert.
- ❖ 6 planches de contre épreuve (chiffres : planches n° 18 à 21, chemins : planches n°28 et 29) : non lues par le sujet normal mais lues par le sujet pathologique. Elles sont composées d'un mélange de pastilles orange, vertes, grises, rouges et roses.
- 6 planches de diagnostic qualitatif (chiffres : planches n° 22 à 25, chemins : planches n° 26 et 27) : Elles sont composées de pastilles rouges et pourpre sur fond de pastilles grises.

Pour le dépistage rapide, la notice explicative recommande de ne tester que 6 planches:

- 2, 6, 10, 14, 18 pour les chiffres
- 38, 36, 34, 32, 30, 28 et 26 pour les chemins

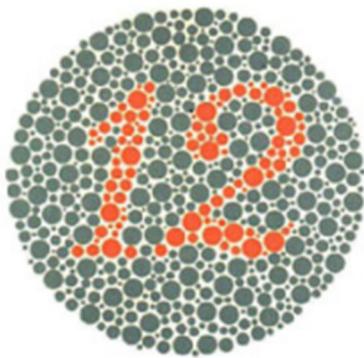


Figure 11 : Planche 01 du test d'Ishihara

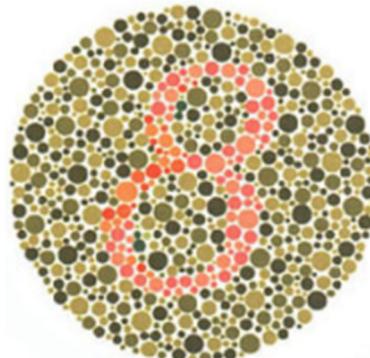


Figure 12 : Planche 02 du test d'Ishihara

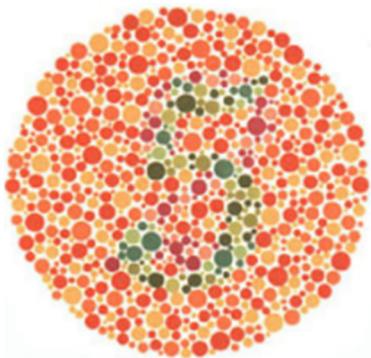


Figure 13 : Planche 06 du test d'Ishihara

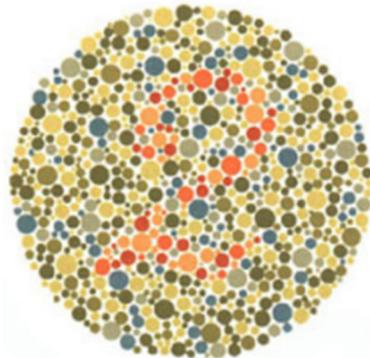


Figure 14 : Planche 10 du test d'Ishihara

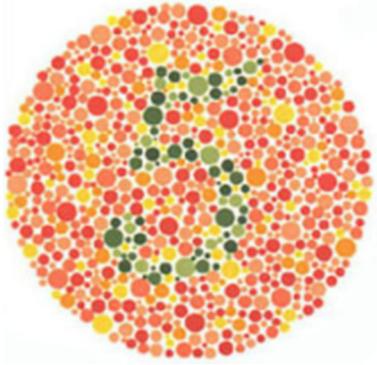


Figure 15 : Planche 14 du test d'Ishihara

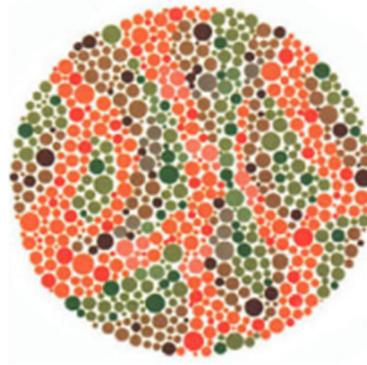


Figure 16 : Planche 18 du test d'Ishihara

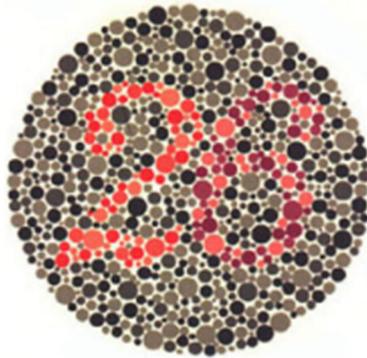


Figure 17 : Planche 22 du test d'Ishihara

C. Résultats

Un sujet est considéré comme normal s'il lit au moins 17 des 21 planches de chiffres et considéré comme anormal s'il lit moins de 13 planches.

Pour le dépistage rapide, s'il lit toutes les planches sans hésitation, il est considéré comme normal.

Pour les planches n° 1 et n° 38, les dyschromates, tout comme les sujets sains suivent le même tracé orange.

Pour les planches n° 2 à 5 et n° 36 à 37, les dyschromatopsies de type protan et deutan suivent les tracés bleuâtre-vert et pourpre, au lieu des tracés pourpre et orange, comme les sujets normaux, et les achromates ne distinguent aucun tracé.

Pour les planches n° 6 à 9 et n° 34 à 35, les dyschromatopsies de type protan et deutan suivent les tracés bleuâtre-vert et pourpre, au lieu des tracés bleuâtre-vert et jaunâtre-vert, comme les sujets normaux, et les achromates ne distinguent aucun tracé.

Pour les planches n°10 à 13 et n° 32 à 33, les dyschromatopsies de type protan et deutan ne voient pas le tracé marron contrairement aux sujets normaux. Les achromates ne distinguent aucun tracé.

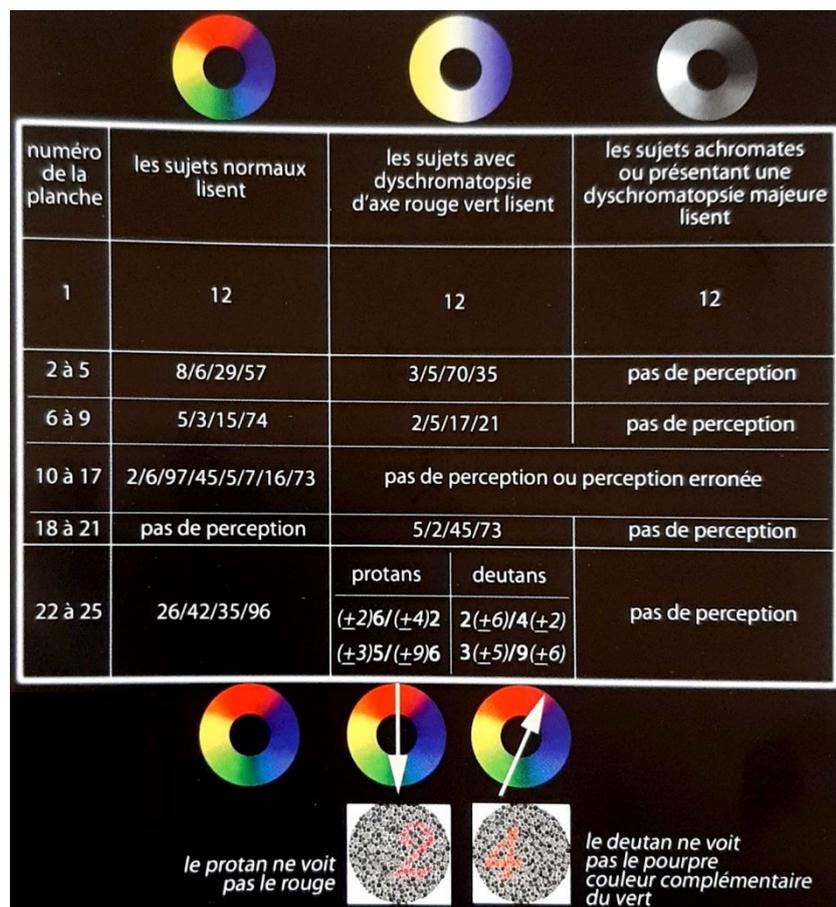
Pour les planches n°14 à 17 et n° 30 à 31, les dyschromatopsies de type protan et deutan ne suivent pas le tracé bleuâtre-vert contrairement aux sujets normaux. Les achromates ne distinguent aucun tracé.

Pour les planches n°18 à 21 et n° 28 à 29, les dyschromatopsies d'atteinte rouge/verte vont percevoir un tracé entre les pastilles grise-rose-verte alors que les sujets normaux et les achromates ne perçoivent aucun tracé.

Les planches n° 22 à 25 présentent des nombres à deux chiffres. Les dyschromatopsies congénitales de type protan ne perçoivent que le chiffre de l'unité, tandis que les dyschromatopsies congénitales de type deutan peuvent percevoir que le chiffre des dizaines du nombre. Les protanopies ou fortes protanomalie et les deutéranopies ou fortes deutéranomalies sont censés voir uniquement un seul chiffre, tandis que les protanomalies légères et les deutéranomalies légères peuvent lire les deux chiffres du nombre. Les sujets normaux perçoivent les deux chiffres et les achromates ne distinguent aucun chiffre.

Les planches n° 26 et 27 présentent des serpentins rouges et pourpres. Les protanopes et forts protanormaux ne perçoivent que le tracé pourpre. Les protanormaux légers peuvent suivre les deux tracés mais plus difficilement le tracé rouge. Les deutéranopes et forts deutéranormaux ne perçoivent que le tracé rouge, et les deutéranormaux légers peuvent suivre les deux tracés mais plus difficilement le tracé pourpre. Les sujets normaux perçoivent les deux tracés et les achromates ne distinguent aucun tracé.

L'Ishihara est un outil de dépistage. Il a une valeur qualitative mais non quantitative de l'anomalie. On peut en dégager un axe qui sera exact dans la plupart des cas, mais il convient de confirmer le diagnostic avec un test de classement, plus précis, comme le Farnsworth.



numéro de la planche	les sujets normaux lisent	les sujets avec dyschromatopsie d'axe rouge vert lisent	les sujets achromates ou présentant une dyschromatopsie majeure lisent
1	12	12	12
2 à 5	8/6/29/57	3/5/70/35	pas de perception
6 à 9	5/3/15/74	2/5/17/21	pas de perception
10 à 17	2/6/97/45/5/7/16/73	pas de perception ou perception erronée	
18 à 21	pas de perception	5/2/45/73	pas de perception
22 à 25	26/42/35/96	protans	pas de perception
		deutans	
		(+2)6/(+4)2	2(+6)/4(+2)
		(+3)5/(+9)6	3(+5)/9(+6)

le protan ne voit pas le rouge

le deutan ne voit pas le pourpre couleur complémentaire du vert

Figure 18 : résultats du test d'Ishihara des planche n°1 à 25 [31]

Partie 5 : Etude clinique

A. Matériel et méthode

Pour étudier l'efficacité des verres filtrants sur des personnes atteintes de dyschromatopsies congénitales de type protan et deutan au test d'Ishihara, nous avons choisi de réaliser une étude expérimentale en évaluant l'amélioration subjective des contrastes entre les couleurs au test d'Ishihara chez les personnes daltoniennes avec les verres filtrants.

Au sein de la population étudiée, notre échantillon était composé de 11 patients atteints de dyschromatopsie congénitale, dont 11 hommes, tous âgés de 15 à 74 ans, avec une moyenne d'âge de 40,27 ans. Toutes les informations nécessaires pour assurer l'inclusivité des sujets dans cette étude (antécédents ophtalmologiques, généraux, familiaux, les traitements, l'état général...) ont été recueillies après un entretien.

Les critères d'inclusions sont les suivants :

- Dyschromatopsies congénitales de type protan et deutan
- Une ou plusieurs personnes atteintes daltonienne au sein de la famille du sujet
- Sujets de 10 ans minimum

Les critères d'exclusions sont les suivants :

- Dyschromatopsies acquises (c'est-à-dire non présente depuis la naissance)
- Pathologies des voies visuelles (pathologies rétiniennes notamment maculaire et papillaires, choroïdiennes etc)
- Pathologies des milieux transparents oculaires (pathologies cornéennes, cristallinienne, du vitrée)
- Pathologies générales nécessitant un suivi ophtalmologique
- Antécédents d'AVC ou pathologie du système nerveux centrale
- Traitements nécessitants un suivi ophtalmologique
- Prises de substances psychoactives

Pour nous assurer que les sujets soient bien porteurs d'une anomalie de type protan ou deutan, nous nous sommes basés sur les réponses données au test d'Ishihara, de la planche n°22 à la planche n°25 inclus. Les sujets ont été testés sans verres filtrants, avec leur correction optique. Nous avons pu ainsi évaluer approximativement le type d'anomalie de chaque sujet.

Pour cette étude, nous disposons donc d'un test d'Ishihara, ainsi que de deux types de verres filtrants de la catégorie Koloblind de la société Koptical. Nous nous sommes munis des verres KP Rose Miroir, et le KD Violet Miroir, présentés ultérieurement (tout au long de l'article, les verres KP Rose Miroir seront mentionné sous le terme "verres P"), et les verres KD Violet Miroir seront mentionné sous le terme "verres D").

Les sujets étaient assis devant une table sur laquelle était présenté le test d'Ishihara. Afin de rendre les résultats des tests aussi fiables que possible, il convenait d'avoir un éclairage adapté pour que le rendu des couleurs soit le plus fiable possible. L'éclairage ne devait pas être trop faible, afin d'être dans une ambiance photopique, ni trop élevé pour ne pas éblouir le sujet et l'empêcher de percevoir correctement le test. Ainsi, le test était éclairé par une lampe de bureau dont la puissance lumineuse était contrôlée par un luxmètre pour chaque passage. Pour maintenir une ambiance photopique convenable, les tests ont été réalisés en journée, à proximité d'une source lumineuse comme une fenêtre ou sous une lumière artificielle.

Chaque sujet a été testé sur le test d'Ishihara, de la planche n°1 jusqu'à la planche n°25, et cela selon trois conditions d'examen. Dans l'ordre, le sujet a été examiné avec sa correction optique optimale, c'est-à-dire, sans aucun filtre. Ensuite, le sujet a été examiné avec sa correction optique optimale et également avec les verres filtrants "P". Enfin, le sujet a été examiné avec sa correction optique optimale et également avec les verres filtrants "D". Chaque verre filtrant se présente sans branches, de telle sorte que les verres peuvent être accolés devant les verres de la correction optique de la personne sans difficultés.

Pour une meilleure interprétation des réponses données par notre échantillon d'étude, les résultats collectés ont été présentés sous forme de scores. Une réponse était considérée comme correcte lorsque le sujet lisait le numéro indiqué sur la planche. Dans le cas contraire, la réponse était considérée comme incorrecte, c'est-à-dire lorsque le nombre lu par le sujet était différent du nombre indiqué sur la planche. Ainsi, chaque patient présentait trois scores comprenant : un score sans filtre et avec sa correction optique, un score avec les verres filtrant "P" et avec sa correction et enfin un score avec les verres filtrant "D" et avec sa correction.

B. Résultats

Pour cette étude, notre échantillon de départ comportait douze patients dyschromates. Cependant, après avoir recueilli toutes les informations nécessaires, nous avons dû écarter un patient qui ne rentrait pas dans nos critères d'inclusions. Au début, notre échantillon se composait de douze dyschromates congénitaux de type protan et deutan, dont onze hommes et une femme. Finalement, cette étude se compose de onze dyschromates congénitaux de type protan et deutan, tous des hommes.

Après le premier passage au test d'Ishihara avec la correction optique et en se référant aux données permettant d'analyser le type d'anomalie colorée fourni par ce test, nous avons ensuite répertorié le type d'anomalie de la vision des couleurs de chaque sujet. En voici les résultats :

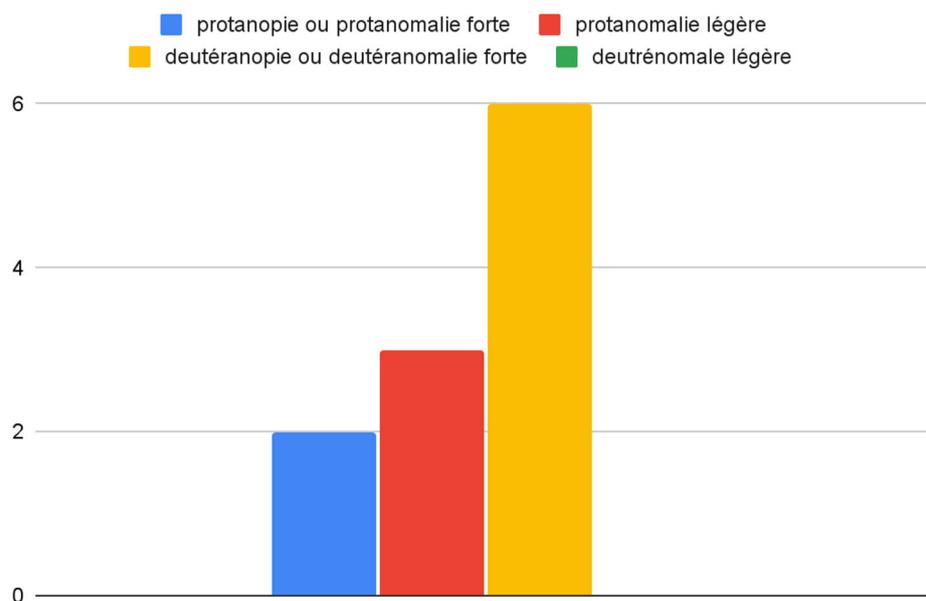


Figure 1 : Histogramme représentant les effectifs de chaque anomalie de dyschromatopsie congénitale au sein de l'échantillon (n = 11)

Ainsi, d'après le dans cet échantillon, 18,18% des sujets étaient protanopes ou protanormaux forts, 27,27% des sujets étaient protanormaux légers, 54,55% des sujets étaient deutéranopes ou deutéranormaux forts. Cependant, aucune anomalie de type deutéranomalie légère n'a été retrouvée.

Par la suite, nous avons recueilli toutes les réponses par planches pour chaque sujet, qui ont été analysés et convertis en un score global pour chacune des trois conditions d'examen au test d'Ishihara.

Pour rappel, chaque réponse juste était considérée comme un point, et les réponses fausses ne comptaient comme aucun point ou "zéro" point. Les trois conditions d'examens sont les suivantes :

- Sans verres filtrants,
- Avec les verres filtrants "P"
- Avec les verres filtrants "D"

Au final, on obtient pour tout patient trois scores différents, c'est-à-dire :

- Score sans verres filtrants,
- Score avec les verres filtrants "P"
- Score avec les verres filtrants "D"

Voici ci-dessous les résultats récoltés :

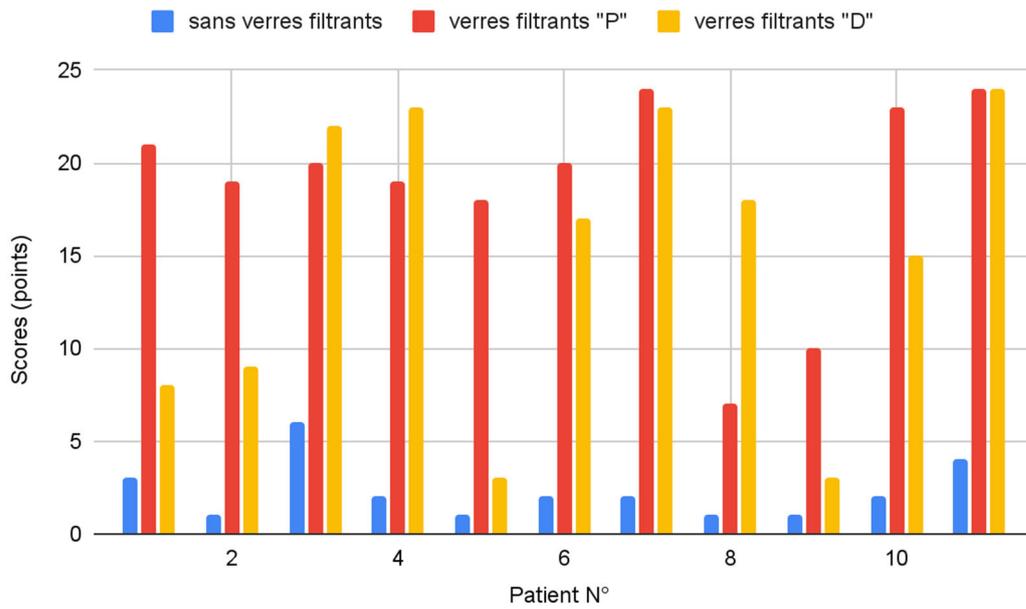


Figure 2 : Histogramme représentant les scores pour chaque sujet en fonction des conditions d'examen (n = 11)

Nous avons enfin regroupé les résultats des scores au test d'Ishihara dans les différentes conditions d'examens par catégorie d'anomalie de la vision des couleurs protan et deutan. Voici les résultats :

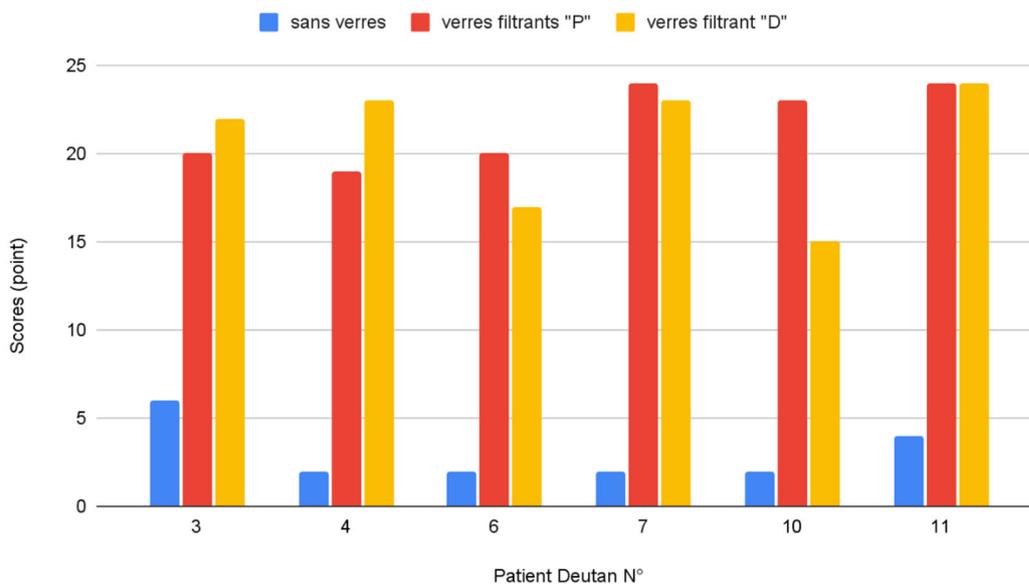


Figure 2 : Histogramme représentant les score pour chaque dyschromate congénitale d'anomalie deutan en fonction des conditions d'examens

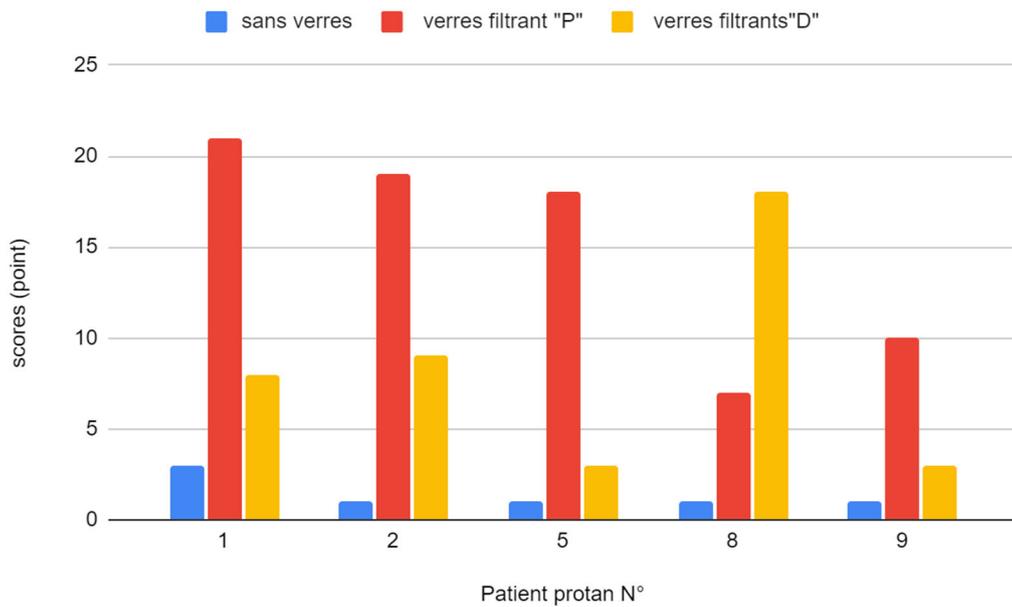


Figure 2 : Histogramme représentant les scores pour chaque dyschromate congénitale d’anomalie protan en fonction des conditions d’examen

Le but de l’étude était de savoir si le port des verres filtrants augmente les performances au test d’Ishihara, et ainsi de savoir si les verres filtrants améliorent réellement la sensibilité aux contrastes chez les daltoniens.

Nous cherchions donc à mettre en évidence l’existence d’une différence significative entre les performances sans verres filtrants et les performances avec les filtres. Ainsi, 2 hypothèses en ressortent. L’hypothèse 0 établissait que les verres filtrants n’améliorent pas les performances du dyschromate congénital de type protan et deutan au test d’Ishihara. L’hypothèse 1 établit que les verres filtrants améliorent les performances du dyschromate congénital de type protan et deutan au test d’Ishihara. Grâce au logiciel de statistiques JASP, nous avons tout d’abord établi les moyennes et écart-type de chaque condition d’examen, c’est-à-dire sans filtres, avec les filtres “P” et avec les filtres “D”.

Descriptive Statistics ▼

	sans filtres	filtres ""P""	filtres ""D""
Valid	11	11	11
Mean	2.273	18.636	15.000
Std. Deviation	1.555	5.446	8.025

Figure 3 : Tableau représentant les moyennes et écart-types des scores en fonction de chaque condition d’examen (logiciel : JASP)

Ensuite, nous avons testés les hypothèses 0 et 1 en prenant seulement en compte les verres filtrants "P", c'est-à-dire :

- Hypothèse 0 : les verres filtrants "P" n'améliorent pas les performances du dyschromate congénital de type protan et deutan au test d'Ishihara.
- Hypothèse 1 : les verres filtrants "P" améliorent les performances du dyschromate congénital de type protan et deutan au test d'Ishihara

Paired Samples T-Test

Measure 1	Measure 2	t	df	p
sans filtres	- filtres "P"	-11.020	10	< .001

Figure 4 : Résultats du test de Student Paired Samples T-Test effectué entre les scores mesurés sans filtres et les scores mesurés avec les filtres "P" (logiciel : JASP)

Conditions d'examen	
Sans verres filtrants (n=11)	2,273 +/- 1,555 points
Avec verres filtrants "P"* (n=11)	18,636 +/- 5,446 points
*différence par rapport à la condition "sans verres filtrants", p<0,001, paired Samples T-Test, p<0,05	

Figure 5 : Tableau représentant les scores en fonction des conditions d'examen sans verres filtrants et avec les verres filtrants "P", moyenne +/- écart-type

Grâce au test statistique au test paired Samples T-Test (un t-test de Student), nous avons pu voir que la différence des performances des sujets sans verres filtrants et avec verres filtrants "P" au test d'Ishihara est significative car p-value (probability value) est inférieur à 0,05 (en effet, p-value est ici inférieur à 0,001).

Nous avons reproduit ensuite la même démarche, mais cette fois en prenant seulement en compte les verres filtrants "D", c'est-à-dire :

- Hypothèse 0 : les verres filtrants "D" n'améliorent pas les performances du dyschromate congénital de type protan et deutan au test d'Ishihara.
- Hypothèse 1 : les verres filtrants "D" améliorent les performances du dyschromate congénital de type protan et deutan au test d'Ishihara

Paired Samples T-Test				
Measure 1	Measure 2	t	df	p
sans filtres	- filtres "D"	-5.765	10	< .001

Figure 6 : Résultats du test de Student Paired Samples T-Test effectué entre les scores mesurés sans filtres et les scores mesurés avec les filtres "D" (logiciel : JASP)

Conditions d'examen	
Sans verres filtrants (n=11)	2,273 +/- 1,555 points
Avec verres filtrants "D"* (n=11)	15,000 +/- 8,025 points
*différence par rapport à la condition "sans verres filtrants", p<0,001, paired Samples T-Test, p<0,05	

Figure 7 : Tableau représentant les scores en fonction des conditions d'examen sans verres filtrants et avec les verres filtrants "D", moyenne +/- écart-type

Grâce au test statistique au test paired Samples T-Test (un t-test de Student), nous avons pu voir que la différence des performances des sujets sans verres filtrants et avec verres filtrants "D" au test d'Ishihara est significative une nouvelle fois car p-value est inférieur à 0,05 (en effet, p-value est ici inférieur à 0,001).

Enfin, nous avons voulu savoir s'il existe une différence significative entre les performances avec les verres filtrants "P" et les verres filtrants "D", c'est-à-dire si un seul type de verres filtrants serait plus efficace que l'autre sur les sujets dyschromates congénitaux de type protan et deutan. Pour cela, nous avons réalisé les mêmes démarches que précédemment. Nous avons ainsi établi les hypothèses suivantes :

- Hypothèse 0 : il n'y a pas de différence entre les performances du dyschromate congénital de type protan et deutan au test d'Ishihara avec les verres filtrants "P" et les verres filtrants "D".
- Hypothèse 1 : il y a une différence entre les performances du dyschromate congénital de type protan et deutan au test d'Ishihara avec les verres filtrants "P" et les verres filtrants "D".

Paired Samples T-Test

Measure 1	Measure 2	t	df	p
filtres "P"	- filtres "D"	1.541	10	0.154

Figure 8 : Résultats du test de Student Paired Samples T-Test effectué entre les scores mesurés es score mesurés avec les filtres "P" et les scores mesurés avec les filtres "D" (logiciel JASP)

Conditions d'examen	
Avec verres filtrants "P" (n=11)	18,636 +/- 5,446 points
Avec verres filtrants "D"* (n=11)	15,000 +/- 8,025 points
* pas de différence par rapport à la condition "Avec verres filtrants "P", p = 0,154, paired Samples T-Test, p>0,05	

Figure 9 : Tableau représentant les scores en fonction des conditions d'examen avec verres filtrants "P" et avec les verres filtrants "D", moyenne +/- écart-type

Ainsi, grâce au test statistique au test paired Samples T-Test (un t-test de Student), nous avons pu voir que la différence entre les performances des sujets avec verres filtrants "P" et les performances des sujets avec verres filtrants "D" au test d'Ishihara est non significative car p-value est supérieur à 0,05 (en effet, p-value est ici égale à 0,154).

C. Discussion

1. Analyse des résultats

Pour rappel, pour étudier l'efficacité des verres filtrants sur onze dyschromates congénitaux de type protan et deutran au test d'Ishihara, nous avons comparé les performances des sujets sans verres filtrants, avec les verres filtrants "P" et avec les verres filtrants "D". Dans notre échantillon de onze sujets et d'après les résultats au test d'Ishihara, six d'entre eux étaient deutranopes ou deutranomaxes forts, deux d'entre eux étaient protanopes ou protanormaux forts, et trois d'entre eux étaient protanormaux légers.

Après avoir analysé les résultats, nous observons que les performances au test d'Ishihara sont augmentées avec les verres filtrants "P" et "D". Les sujets testés perçoivent davantage les nombres inscrits sur les planches avec les filtres que sans les filtres. En effet, pour que les réponses des sujets dyschromates se rapprochent au plus d'un sujet sain, il faut que les sujets lisent au moins 17 des 21 planches (hors les 4 planches de détermination du type de dyschromatopsie congénitale), c'est-à-dire que les sujets doivent présenter un score minimum de 17. Or, il peut être observé que 90,91% des sujets présentent un score supérieur ou égal à 17 avec les verres "P" et/ou les verres "D". La perception des contrastes est augmentée pour la majorité des sujets dyschromates de notre étude.

De plus, en comparant les moyennes des scores avec les verres "P" et "D" au test paired Samples T-Test, les performances au test ne sont pas significativement augmentées entre les verres "P" et "D". Les performances semblent être autant améliorées avec les filtres "P" qu'avec les filtres "D". La paire de verres filtrants "P" n'est donc pas plus efficace que la paire de verres filtrants "D". En comparant au cas par cas, 45,45% des sujets présentent un score supérieur ou égal à 17 avec les verres "P" et les verres "D".

Cependant, les scores chez certains sujets semblent être améliorés avec un seul type de filtre, plutôt que l'autre. En effet, 36,36% des sujets présentent un score supérieur ou égal à 17 avec seulement les verres "P", contre 9,09% des sujets qui présentent un score supérieur ou égal à 17 avec seulement les verres "D".

Par ailleurs, nous avons comparé les résultats des scores et le type d'anomalie de la vision des couleurs en fonction de chaque patient. Nous pouvons observer que quatre patients sur cinq soit 80% des sujets d'anomalie protan ont de meilleurs scores avec les verres "P", et un patient sur cinq soit 20% d'entre eux ont de meilleurs scores avec les verres "D". Pour les sujets d'anomalie de la vision des couleurs de type deutan, deux sujets sur six soit 33,33% d'entre eux présentent de meilleurs scores avec les verres "D" et que trois sujets sur six soit 50% d'entre eux présentent de meilleurs scores avec les verres "P". Seulement un patient sur six soit 16,67% d'entre eux présente un score identique aux verres "P" et "D".

Ainsi, nous ne pouvons pas conclure qu'un type de verre est plus approprié pour un type dyschromatopsie en particulier. L'amélioration des contrastes entre les différentes couleurs est perçue de manière subjectivement différente entre chaque patient, indépendamment de son degré d'anomalie de la vision des couleurs.

2. Limites et biais de l'étude

Dans ce mémoire nous avons donc étudié les performances des sujets daltoniens avec le test d'Ishihara. Comme cité précédemment, le test d'Ishihara est plutôt utilisé comme un test de dépistage. Il existe ainsi d'autres tests permettant d'évaluer l'acuité chromatique. En effet, effectuer le test de la vision des couleurs FARNSWORTH HUE 15 saturé, en plus du test d'Ishihara sur chaque sujet de cet échantillon, sans verres filtrants, puis avec les verres "P" et "D" aurait permis de mieux apprécier l'amélioration des contrastes entre les différentes couleurs des pastilles du test FARNSWORTH HUE 15. D'autres auteurs ont ainsi utilisé le test

de FARNSWORTH HUE 15 (*Varikuti VNV, Zhang C, Clair B, Reynolds AL. “Effect of EnChroma glasses on color vision screening using Ishihara and Farnsworth D-15 color vision tests.”* [18]) en plus du test d'Ishihara.

D'autres sources ont également pu déterminer spécifiquement le type de dyschromatopsie congénitale au sein de la population de leur étude grâce à des tests génétiques, ce que nous n'avons pas pu réaliser dans ce mémoire, faute de moyens et de temps. Il aurait été plus pertinent de comparer les différentes réponses des sujets avec les verres filtrants “P” et “D” en fonction de leur anomalie de la vision des couleurs. En effet, utiliser le test d'Ishihara est une manière non objective et approximative d'analyser le type de dyschromatopsie des sujets, car ici, les deutéranopes et deutéranormaux sont regroupés en une seule catégorie selon le test d'Ishihara, alors que leurs performances pourraient être différentes, en raison de leur origine génétique totalement distinctes.

Par ailleurs, il aurait été intéressant de comparer les performances des sujets avec différentes marques de verres filtrants, en plus des verres KP Rose Miroir et KD Violet Miroir de la gamme Koloblind, et de pouvoir ainsi comparer et mettre en évidence d'éventuelles différences d'efficacités ou de performances entre certains produits mis en avant sur le marché et proposés à la population dyschromate.

Enfin, notre étude se heurte au nombre de sujets étudiés. En effet, le petit effectif de notre échantillon ne permet pas de faire une généralisation sur l'ensemble de la population dyschromate, car, comme observé dans les résultats, certains sujets présentent des scores plus faibles avec les verres “P” et “D”, par rapport à d'autres sujets qui présentent des scores élevés, presque aussi proches qu'un sujet sain.

Conclusion

Les dyschromatopsies congénitales de type protan et deutan sont des déficiences visuelles héréditaires qui affectent la capacité à percevoir certaines couleurs. Ces affections sont incurables mais elles peuvent être compensées par des verres de filtration de la lumière blanche.

Dans notre étude, nous avons analysé l'efficacité des verres filtrants chez les personnes atteintes de dyschromatopsie congénitale de type protan et deutan avec le test d'Ishihara. Après avoir analysé les résultats, nous observons une amélioration de la perception des contrastes entre les couleurs du test d'Ishihara avec les verres filtrants KP Rose Miroir et KD Violet Miroir de la gamme Koloblind, chez les personnes daltoniennes étudiés dans ce mémoire.

A terme, ces moyens de compensations optiques pourraient être utilisés chez la population daltonienne pour combler leur trouble et ainsi, les dyschromates congénitaux pourraient accéder à certains métiers qui leur sont interdits, ou simplement pour réaliser des activités nécessitant la perception des contrastes entre les différentes couleurs.

Cependant, nous ne pouvons faire cette affirmation que sur le test pseudo-isochromatique d'Ishihara. En effet, nous ne pouvons pas faire une étendre ce dire sur d'autres tests de la vision des couleurs, ou même dans l'environnement qui nous entoure.

De plus, dans le cadre où cette anomalie est congénitale, la population dyschromate a pu s'adapter à leur affection présente depuis toujours, et après leur avoir posé la question, la plupart des sujets de notre étude ne porteraient pas les verres filtrants en permanence, car ils n'en ressentent pas un réel besoin.

Bibliographie

- [1] Valérie Bonnardel, "Catégorisation et dénomination des couleurs chez les daltoniens", OCTOBRE 2006, LRO
- [2] L. Zografos, "Dépistage des dyschromatopsies et orientation professionnelle" Clinique ophtalmologique universitaire de Lausanne (Directeur prof. Cl. Gailloud), Médecine sociale et préventive 24, 349-352 (1979)
- [3] Christophe Orssaud, "La vision des couleurs de l'enfant et son exploration", Revue Francophone d'Orthoptie, Volume 7, Issue 3, July–September 2014, Pages 192-199
- [4] F. Rigaudière (1, 2), J. Leid (3), F. Viénot (4), J.-F. Le Gargasson (1, 2), "Comprendre et tester les déficiences de la vision des couleurs de l'enfant, en pratique", *J Fr. Ophtalmol.*, 2006; 29, 1, 87-102 © Masson, Paris, 2006.
- [5] B. L. COLE, G. H. HENRY and J. NATHAN, "PHENOTYPICAL VARIATIONS OF TRITANOPIA", *Vision Rrs.* Vol. 6, pp. 301-313. Pergamon Press 1965.
- [6] Jeffrey Naifeh 1, Evan J. Kaufman 2, "Vision des couleurs", dans : StatPearls [Internet]. Île au trésor (FL) : StatPearls Publishing ; 2023 janvier. 31 octobre 2022
- [7] C. Salesse, "Physiologie du signal visuel rétinien : de la phototransduction jusqu'au cycle visuel", *J Fr d'Ophtalmol.*, Volume 40, Issue 3, March 2017, Pages 239-250
- [8] Dr Bernard Pidoux, "NEUROPHYSIOLOGIE de la VISION", janvier 2011, Psychomotricité – Cours Neurophysiologie – Vision
- [9] Maryam Fourtassi, "Étude des mouvements oculaires au cours de l'imagerie mentale visuelle, chez les sujets sains et chez ceux atteints d'une négligence représentationnelle ou d'une hémianopsie latérale homonyme", Neurosciences. Université de Lyon, 2016. Français. (NNT : 2016LYSE1287).
- [10] Makoto Kusunoki, Konstantinos Moutoussis and Semir Zeki, "Effect of Background Colors on the Tuning of Color-Selective Cells in Monkey Area V4", June 2006, *Journal of Neurophysiology* 95(5):3047-59
- [11] J. FRANCOIS, S. DE BIE, G. VERRIEST, M. TH. MATTON, "Conceptions actuelles sur l'hérédité des déficiences congénitales de la vision des couleurs", Sections de Genetique Medicale et de Physiologie Sensorielle, Clinique Ophtalmologique de l'Université de Gand, Belgique (Directeur: Prof. J. François), (1972)
- [12] H.R. Blackwell, O.M. Blackwell, "Rod and cone receptor mechanisms in typical and atypical congenital achromatopsia", *Vision Research*, Volume 1, Issues 1–2, June 1961, Pages 62-107

- [13] Remmer, Meredith H. ; Rastogi, Neelesh ; Ranka, Milan P. ; Ceisler, Emily J. . “Achromatopsie : une critique”. *Opinion actuelle en ophtalmologie* 26(5):p 333-340, juillet 2015. | DOI : 10.1097/ICU.0000000000000189
- [14] GOTO-OMOTO SATOSHI, HAYASHI TAKAAKI, GEKKA TAMAKI, KUBO AKIKO, TAKEUCHI TOMOKAZU, KITAHARA KENJI. “Compound heterozygous CNGA3 mutations (R436W, L633P) in a Japanese patient with congenital achromatopsia.” *Visual Neuroscience*. 2006;23(3-4):395-402. doi:10.1017/S095252380623308X
- [15] Piéron Henri. “V. Le dépistage des anomalies de la vision chromatique”. In: *L'année psychologique*. 1939 vol. 40. pp. 94-134.
- [16] “467 Test d'évaluation de la vision des couleurs”, V. Ionique, P. Gastaud, *J Fr d'Ophtalmol, Volume 32, Supplément 1, avril 2009, page 1S145*
- [17] Hermine Chatoux, Noël Richard, Christine Fernandez-Maloigne. “Étude d'un capteur théorique pour une vision déficiente des couleurs.” *Traitement et Analyse de l'Information Méthodes et Applications*, Mar 2020, Hammamet, Tunisie. fahal-02503786f
- [18] Varikuti VNV, Zhang C, Clair B, Reynolds AL. “Effect of EnChroma glasses on color vision screening using Ishihara and Farnsworth D-15 color vision tests.” *J AAPOS*. 2020 Jun;24(3):157.e1-157.e5. doi: 10.1016/j.jaapos.2020.03.006. Epub 2020 Jun 1. PMID: 32497581.
- [19] Patterson EJ, Mastey RR, Kuchenbecker JA, Rowlan J, Neitz J, Neitz M, Carroll J. “Effects of color-enhancing glasses on color vision in congenital red-green color deficiencies.” *Opt Express*. 2022 Aug 15;30(17):31182-31194. doi: 10.1364/OE.451295. PMID: 36242206; PMCID: PMC9576280.
- [20] Gómez-Robledo L, Valero EM, Huertas R, Martínez-Domingo MA, Hernández-Andrés J. “Do EnChroma glasses improve color vision for colorblind subjects?” *Opt Express*. 2018 Oct 29;26(22):28693-28703. doi: 10.1364/OE.26.028693. PMID: 30470042.
- [21] Pattie C, Aston S, Jordan G. “Do EnChroma glasses improve performance on clinical tests for red-green color deficiencies?” *Opt Express*. 2022 Aug 29;30(18):31872-31888. doi: 10.1364/OE.456426. PMID: 36242261.
- [22] Bastien K, Mallet D, Saint-Amour D. “Characterizing the Effects of Enchroma Glasses on Color Discrimination.” *Optom Vis Sci*. 2020 Oct;97(10):903-910. doi: 10.1097/OPX.0000000000001581. PMID: 33055508.
- [23] Biancucci C, Roudinsky A (2008). “Les dyschromatopsies.” [Texte imprimé], [s.n].
- [24] M. Marechal, M. Delbarre, M. Berguiga, D. Benisty, F. Froussart-Maille “Dyschromatopsies héréditaires : physiologie, classification, diagnostic et application à l'aéronautique”, *J Fr d'Ophtalmol, Volume 42, Issue 2, February 2019, Pages 177-188*
- [25] Jacquinot F, Moraiz C, Le Fur M. “Evaluation de Deux Tests de La Vision Des Couleurs Chez l'enfant de Moins de Six Ans.”; 2014

[26] Rabin J, Silva F, Trevino N, Gillentine H, Li L, Inclan L, Anderson G, Lee E, Vo H. "Performance enhancement in color deficiency with color-correcting lenses." Eye (Lond). 2022 Jul;36(7):1502-1503. doi: 10.1038/s41433-021-01924-0. Epub 2022 Jan 8. PMID: 34999724; PMCID: PMC9232552.

[27] Boulanger B, Guellati-Khelifa S, Hennequin D, Stehle M, Lehoucq R, eds. "La Lumière En Lumière : Du Photon à l'Internet". EDP Sciences; 2016

[28] Behar-Cohen F, Gelizé E, Jonet L, Lassiak P. "Anatomy of the retina." Medecine/Sciences. 2020;36(6-7):594-599-599. doi:10.1051/medsci/2020094

[29] Plutino A, Armellin L, Mazzoni A, Marcucci R, Rizzi A. "Aging variations in Ishihara test plates." Color Res Appl. 2023; 48(6): 721-734.

[30] Heesen, Remco (2015) The Young-(Helmholtz)-Maxwell "Theory of Color Vision."

[31] M.-F.Clenet, C. Hervault "Guide de l'orthoptie" Edition Elsevier Masson

Sites Internet

http://www.daltonisme.com/les-causes#google_vignette

https://fr.amenajari.org/articles/theories/understanding-the-trichromatic-theory-of-color-vision.html#google_vignette

<https://ndgperception.weebly.com/iii-le-daltonisme.html>

<https://eu.enchroma.com/?enchrdrdct=hrd&multisite-redirected=1#multisite-redirected>

<https://www.lesafrance.com/shop/flirp-face-a-main-double-filtres-daltonien-2166?category=141#attr=805,1380>

<https://larevuedesopticiens.com/verres-kolorblind-solution-daltoniens/>

<https://orthoptie.net/documents/Noticelshhara.pdf>

Tables des Illustrations

Figure 1 : Schéma des cellules qui composent la rétine [7]	5
Figure 2 : Schéma d'un bâtonnet (à gauche) et d'un cône (à droite). [7]	7
Figure 3 : Schéma d'absorption de la iodopsine des cônes et de la rhodopsine des bâtonnets. [7]	7
Figure 4 : Schéma des zones cérébrales ; les zones colorées sont impliquées dans le traitement des informations visuelles. [9]	10
Figure 5: Le spectre électromagnétique : le spectre de la lumière blanche détaillé. [27]	18
Figure 6 : Verres filtrants Kolorblind de la marque Koptical.....	20
Figure 7 : Planche 01 du test d'Ishihara. [29]	23

Annexes

Numère de la planche	Vision normale	Dyschromatopsie congénitale de type protane ou deutane				Cécité complète ou perception très affaiblie de la totalité des couleurs
1	12	12				12
2	8	3				×
3	6	5				×
4	29	70				×
5	57	35				×
6	5	2				×
7	3	5				×
8	15	17				×
9	74	21				×
10	2	×				×
11	6	×				×
12	97	×				×
13	45	×				×
14	5	×				×
15	7	×				×
16	16	×				×
17	73	×				×
18	×	5				×
19	×	2				×
20	×	45				×
21	×	73				×
		Protane		Deutane		
		Formes		Formes		
		graves	légères	graves	légères	
22	26	6	(2) 6	2	2 (6)	
23	42	2	(4) 2	4	4 (2)	
24	35	5	(3) 5	3	3 (5)	
25	96	6	(9) 6	9	9 (6)	

Tableau 1 : Lecture type des planche n°1 à 25 du test d'Ishihara

Patient	Age	Sexe
1	15	H
2	18	H
3	74	H
4	31	H
5	59	H
6	49	H
7	56	H
8	17	H
9	20	H
10	59	H
11	45	H

Tableau 2 : *Données des sujets étudiés*

Patient	scores sans verres	scores avec les verres "P"	scores avec les verres "D"
1	3	21	8
2	1	19	9
3	6	20	22
4	2	19	23
5	1	18	3
6	2	20	17
7	2	24	23
8	1	7	18
9	1	10	3
10	2	23	15
11	4	24	24

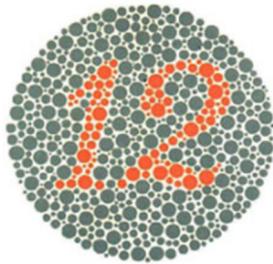
Tableau 3 : *Scores des patients en fonction des différentes conditions d'examen*

Patient	Type de dyschromatopsie congénitale
1	protanomalie légère
2	protanomalie légère
3	deutéranope ou deutéranomalie forte
4	deutéranope ou deutéranomalie forte
5	protanomalie légère
6	deutéranope ou deutéranomalie forte
7	deutéranope ou deutéranomalie forte
8	protanopie ou protanomalie forte
9	protanopie ou protanomalie forte
10	deutéranopie ou deutéranomalie forte
11	deutéranopie ou deutéranomalie forte

Tableau 4 : *Type de dyschromatopsie congénitale analysé à partir du test d'Ishihara*

Participants	éclairage (lux)
1	800
2	1000
3	900
4	900
5	1000
6	2000
7	2000
8	2000
9	1000
10	2000
11	1200

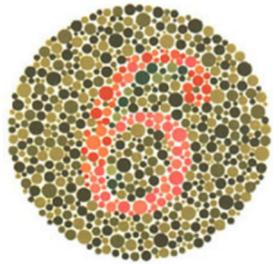
Tableau 5 : *Eclairage lumineux (en lux) mesurés pour chaque passage*



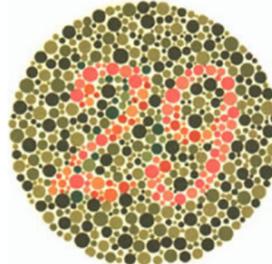
n°1



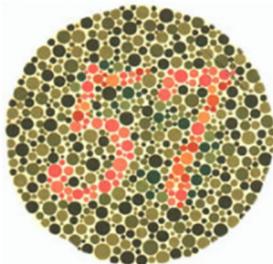
n°2



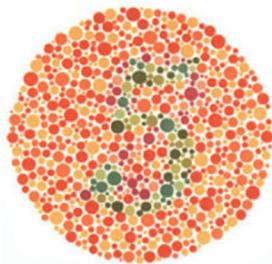
n°3



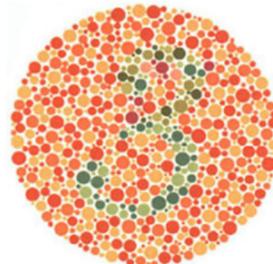
n°4



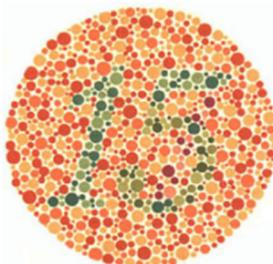
n°5



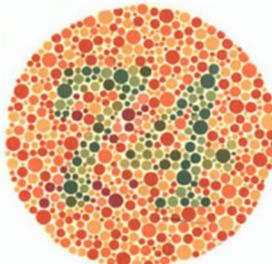
n°6



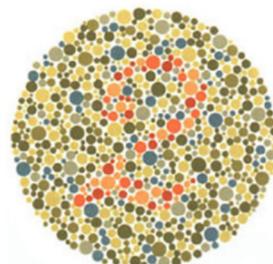
n°7



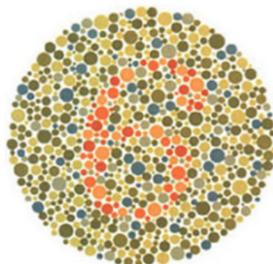
n°8



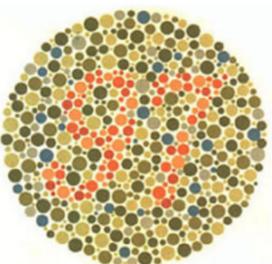
n°9



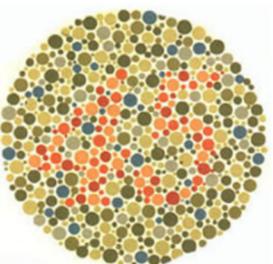
n°10



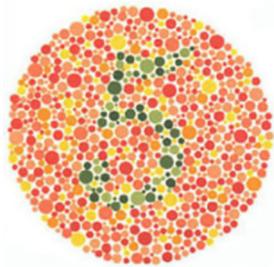
n°11



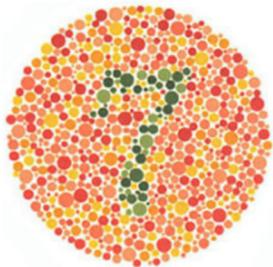
n°12



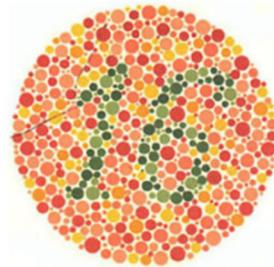
n°13



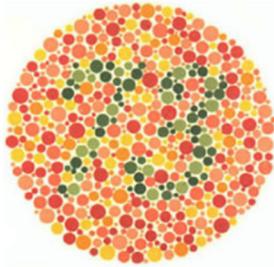
n° 14



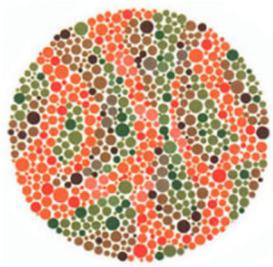
n° 15



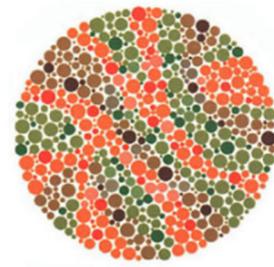
n° 16



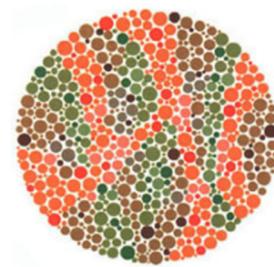
n° 17



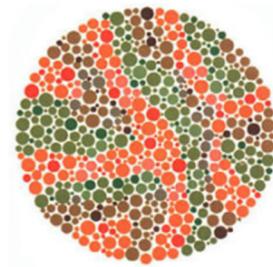
n° 18



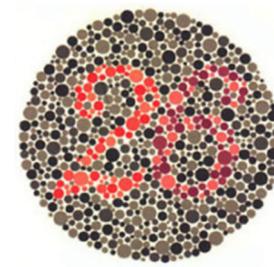
n° 19



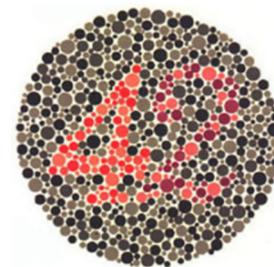
n° 20



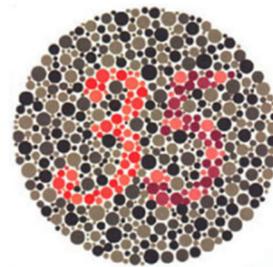
n° 21



n° 22



n° 23



n° 24



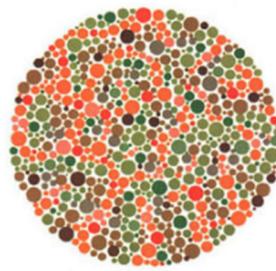
n° 25



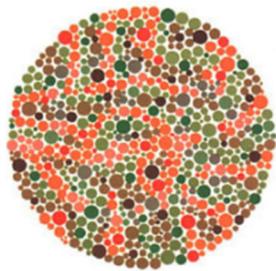
n°26



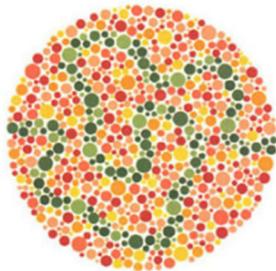
n°27



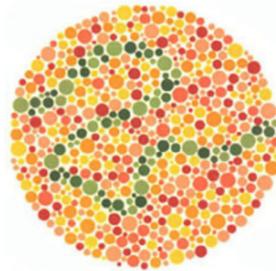
n°28



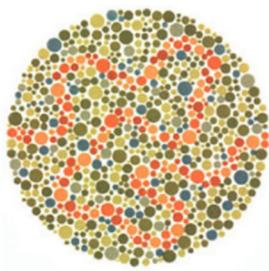
n°29



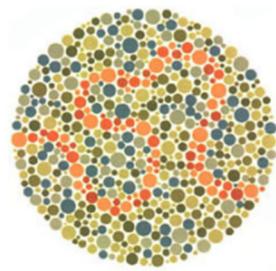
n°30



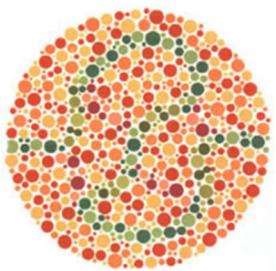
n°31



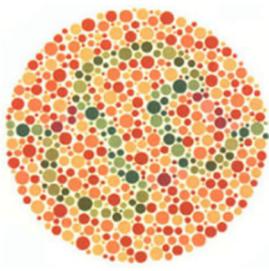
n°32



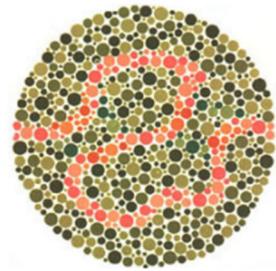
n°33



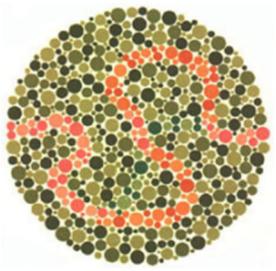
n°34



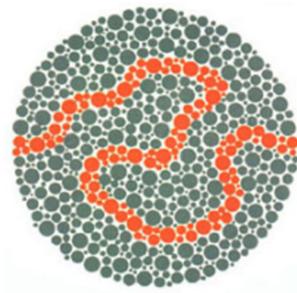
n°35



n°36



n°37



n°38

Tableau 6 : Présentation des 38 planches du test pseudo-isochromatique d'Ishihara