

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFET D'UNE BRÈVE EXPOSITION À LA LUMIÈRE ROUGE SUR LES FONCTIONS VISUELLES

THÈSE DE SPÉCIALISATION
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU BACCALAURÉAT EN PSYCHOLOGIE

PAR
MARC-ANTOINE LOURMÈDE

SOUS LA SUPERVISION DE
DAVE SAINT-AMOUR

AVRIL 2023

REMERCIEMENTS

Un sincère merci à tous les participants qui ont accepté de participer à cette étude. Je tiens aussi à remercier mon directeur de recherche qui a su me guider à travers ma première expérience de recherche, me conseiller et me réviser tout en laissant place à l'apprentissage indépendant. Finalement, je voudrais remercier mes collègues du laboratoire NeuroQAM qui m'ont encouragé et conseillé tout au long de mon parcours.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
RÉSUMÉ	vi
INTRODUCTION	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Cadre théorique	1
1.3 Justification de l'étude	3
MÉTHODE	5
1.1 Procédure.....	5
1.2 Instruments	6
1.2.1 Tests visuels	6
1.2.2 Analyses	7
RÉSULTATS.....	8
DISCUSSION	15
CONCLUSION	19
ANNEXE A APPROBATION DU COMITÉ D'ÉTHIQUE.....	20
ANNEXE C RÉSULTATS DE L'ANOVA À MESURE RÉPÉTÉE DE L'AXE PROTAN.....	25
ANNEXE D RÉSULTATS DE L'ANOVA À MESURE RÉPÉTÉE DE L'AXE DEUTAN	27
ANNEXE E RÉSULTATS DE L'ANOVA À MESURE RÉPÉTÉE DE L'AXE TRITAN.....	29
ANNEXE F RÉSULTATS DE L'ANOVA À MESURE RÉPÉTÉE DU FRACT.....	31
ANNEXE G RÉSULTATS DU WILCOXON À ÉCHANTILLON APPARIÉ	33
BIBLIOGRAPHIE.....	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1.....	11
Figure 2.....	11
Figure 3.....	12
Figure 4.....	13
Figure 5.....	13

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 ANOVA à mesure répétée	9
--	---

RÉSUMÉ

Les cônes de la rétine perdent en moyenne 70% de leur efficacité au cours du vieillissement normal de l'œil humain (Shinhmar et al., 2021). Afin de contrer cette déficience, l'exposition à la lumière rouge sur les fonctions visuelles, plus spécifiquement sur les seuils de sensibilités aux contrastes lumineux, a récemment été un sujet d'étude d'intérêt dans le domaine de la neuropsychologie. En effet, il serait possible d'utiliser la lumière rouge afin de « recharger » les mitochondries des cellules photoréceptrices de la rétine vieillissante, et ainsi en améliorer leurs performances. Une étude menée par une équipe de chercheurs de l'University College de Londres (UCL) en 2021 rapporte des diminutions significatives des seuils de sensibilités de l'axe protan et tritan après une simple exposition à une lumière rouge de 670nm (Shinhmar *et al.*, 2021). L'étude ici présentée tente de reproduire les résultats observés par l'équipe de l'UCL afin de vérifier sa validité. Le seuil de sensibilité aux contrastes de l'axe protan, deutan, tritan et achromatique ont été mesuré chez 32 participants se situant entre 21 et 63 ans. Ces participants ont été également répartis en groupe expérimental et groupe témoin. Notre étude n'établit aucune interaction claire entre la lumière rouge et la perception des contrastes sur les 16 participants du groupe expérimental étudiés. De plus, un effet de pratique est observable entre les deux prises de mesures des seuils de sensibilité, exprimés par les diminutions significatives des participants du groupe contrôle n'ayant pas été sujets à l'exposition rétinale. Ainsi, notre étude n'arrive pas à reproduire les résultats de l'étude menée par Shinhmar et al.

INTRODUCTION

1.1 Problématique

Alors qu'un vieillissement de la population de plus en plus important est observable, le déclin de la santé physique des individus représente un enjeu central pour la société. La diminution des fonctions visuelles des adultes de 40 ans et plus est principalement causée par une déficience de la production d'ATP des mitochondries présentes dans les photorécepteurs de la rétine. La rétine contient la plus grande densité de mitochondrie dans le corps, ce qui en fait l'organe qui vieillit le plus rapidement chez l'humain (Gkotsi et al., 2014). Afin de contrer ce phénomène, des chercheurs se sont récemment attardés sur l'effet d'une exposition à la lumière rouge sur les fonctions visuelles. L'équipe de recherche de Harpreet Shinhmar, de l'institut d'ophtalmologie de l'University College de Londres, a mené deux études témoignant une amélioration des seuils de détections des cônes de la rétine après une exposition à une lumière rouge de 670 nm.

1.2 Cadre théorique

La lumière rouge est de plus en plus utilisée dans le domaine médical pour son action sur le métabolisme cellulaire et ses propriétés anti-inflammatoires. Plusieurs études suggèrent que l'exposition à la lumière rouge pourrait avoir des effets bénéfiques sur la cicatrisation, le sommeil ainsi que le traitement de certaines pathologies (ex.: dommages neurologiques causés par un ACV (Hamblin, 2016)). Cependant, encore peu d'études se sont penchées sur les effets de l'exposition à la lumière rouge sur la vision.

Avec l'âge, la rétine perd naturellement de son efficacité, entraînant une diminution globale de la vision. Cette perte d'efficacité est majoritairement due au vieillissement des cellules photoréceptrices de la rétine et plus particulièrement au déclin des mitochondries, dont le rôle est de produire de l'énergie et de stimuler la fonction cellulaire. Les cônes de la rétine qui sont plus sensibles aux courtes longueurs d'onde, associées au bleu-violet, sont ceux qui contiennent le moins de mitochondries. C'est donc ceux-ci qui sont le plus affectés par le vieillissement naturel des mitochondries, se traduisant en une déficience plus importante de la perception des couleurs bleu-violet (Kam et al., 2019).

Récemment, l'entreprise Eyepower a commercialisé une paire de lunettes permettant d'exposer directement les yeux à la lumière rouge de façon totalement sécuritaire. Cette exposition a pour but de

ralentir le vieillissement des cellules de la rétine. Selon l'entreprise, trois minutes d'exposition à la lumière rouge par semaine suffiraient à maintenir la santé de la rétine et même à améliorer les fonctions visuelles, notamment la sensibilité au contraste de la lumière. La lumière rouge permettrait de stimuler la production d'énergie par les mitochondries et ainsi de « recharger » les cellules vieillissantes de la rétine afin de réduire le déclin visuel (Shinmar et al., 2021). Ce processus d'absorption de la lumière par les cellules est nommé la photobiomodulation.

Les mécanismes sous-jacents à l'absorption des photons de la lumière sont encore aujourd'hui méconnus. Deux théories principales s'opposent; chacune appuyée sur la théorie du vieillissement naturel des mitochondries. La première propose que le cytochrome C oxydase, le quatrième complexe de la chaîne de respiration cellulaire de la mitochondrie, aurait des propriétés photoréceptrices qui serait plus sensible aux ondes proches-infrarouges. Cette absorption de lumière permettrait de stimuler la production de l'ATP (adénosine triphosphate) et de réduire la production de ROS (reactive-oxygen species), des radicaux libres nuisant au fonctionnement de la mitochondrie (Begum et al., 2013). Ceci résulterait à un ralentissement/renversement des pertes de fonctions visuelles des cônes, et donc à une amélioration des perceptions des couleurs. Il est important de noter que ce complexe aurait aussi une sensibilité aux ondes plus courtes (420 nm, correspondant au violet), mais l'absorption d'une telle longueur d'onde causerait une diminution de la production d'ATP et une augmentation de la production de ROS dans la mitochondrie (Osborne et al., 2017), et est donc nuisible au fonctionnement de la cellule.

La deuxième théorie (Sommer, 2019; Sommer et al., 2015), celle de la firme Eyepower, soutient que les ondes proche-infrarouge aurait la capacité de modifier les propriétés physiques de l'eau dans la mitochondrie. Plus spécifiquement, la couche d'eau interfaciale des cellules, qui est de nature plus visqueuse que l'eau courante, deviendrait plus limpide au contact de la lumière rouge. Ce changement physique permettrait à la pompe d'ATP de pivoter plus rapidement grâce à la diminution de friction, et donc d'accélérer la production d'ATP. En somme, une théorie propose une réaction électrochimique de l'absorption de la lumière qui stimulerait la respiration cellulaire, et l'autre propose simplement une modification des propriétés physiques de l'eau dans la cellule, qui permettrait une rotation accrue de la pompe ATP, et donc une plus grande efficacité de la mitochondrie.

Un autre des aspects importants à considérer concernant les effets de l'exposition à la lumière rouge sur la rétine est que ceux-ci semblent dépendre du moment d'exposition. En effet, la mitochondrie serait

optimalement sensible à la réception de l'énergie transportée par la lumière rouge le matin. Quoiqu'encore peu documentée, une étude propose que ce phénomène d'absorption sélective soit dû à la charge de production d'ATP de la mitochondrie qui varie grandement au cours de la journée (Weinrich et al., 2019). La demande de production d'énergie étant moins importante le matin, la mitochondrie aurait la possibilité d'être réceptrice aux ondes proche-infrarouge et de stimuler sa production d'ATP. Plus la journée avance, plus les réserves d'énergies diminuent, entraînant une demande de production d'ATP, empêchant donc la mitochondrie déjà saturée d'être stimulée par la lumière.

Les photorécepteurs de la rétine sont les cellules ayant le plus important rythme métabolique du corps humain (Gkotsi et al., 2014). Étant donné leur grande demande énergétique, les photorécepteurs sont aussi plus susceptibles au vieillissement. Les effets de l'exposition à la lumière rouge sur la rétine ne semblent pourtant pas autant affecter les bâtonnets que les cônes (Shinhmar et al., 2020a). La raison principale est que les bâtonnets de la rétine, avec le vieillissement naturel de l'humain, meurent. Au cours de la vie, la mosaïque rétinale scotopique peut être réduite de 30% (Cunea & Jeffery, 2007). Les cônes, quant à eux, même s'ils perdent en efficacité due à une diminution de rythme métabolique de la production d'ATP, demeurent comparativement stables (Weinrich et al., 2017). C'est théoriquement pourquoi il est possible d'avoir un impact plus important sur les cellules mitochondriales des cônes, qui se « recharge » avec l'absorption de photons provenant de la lumière rouge, et non sur les bâtonnets.

1.3 Justification de l'étude

Notre hypothèse, conformément à la littérature scientifique existante, est que l'exposition à la lumière rouge entraînera une diminution des seuils de contraste visuel. L'objectif de la recherche est de reproduire les résultats des deux études menées par une équipe de chercheurs de l'University College de Londres sur lesquelles la firme Eyepower se base afin d'appuyer les bienfaits de leur produit. Nous croyons qu'une reproduction indépendante de ces études est nécessaire afin de confirmer l'effet bénéfique d'une exposition à la lumière rouge sur les fonctions visuelles.

La première étude de Shinhmar et al., publiée en juin 2019, est constituée d'un échantillon de 24 individus âgés de 28 et 72 ans (Shinhmar et al., 2020b). De cet échantillon, 12 ont été utilisés pour mesurer les seuils de sensibilité scotopique (bâtonnets) et 12 autres ont été utilisés pour mesurer les seuils de sensibilité

photopique (cônes). De ce groupe de 12 participants âgés de 28 et 72 ans, seulement 6 d'entre eux se situaient en dessous de 38 ans. Des résultats significatifs ont été observés chez les participants plus âgés, mais pas chez les plus jeunes. Ainsi, une diminution de 17% et de 12% du seuil de sensibilité de l'axe tritan et protan respectivement ont été observées uniquement chez les 6 participants de 38 ans et plus.

La deuxième étude, plus récente, s'appuie sur les résultats non significatifs des jeunes participants de la première étude afin de recruter des participants de 38 ans et plus uniquement. C'est principalement sur ces bases que la firme Eyepower a commercialisé leur produit, et nous croyons, malgré les résultats d'apparences prometteuses proposés par ces études, qu'il est pertinent de réitérer les effets d'une brève exposition à la lumière rouge qui tient aussi compte des populations plus jeunes. Un échantillon de 6 participants apparaît insuffisant pour disqualifier les jeunes d'une étude de plus grande envergure qui témoignerait des effets de l'exposition, comme nos résultats le montreront plus tard.

MÉTHODE

1.1 Procédure

Cette étude consiste à évaluer les capacités de perception visuelle à la suite de l'exposition à la lumière rouge auprès de 16 participants. Les résultats ont été comparés à un groupe témoin (sans exposition) de 16 participants également. Les participants, âgés de 21 et 63 ans et ayant une vision normale (pas d'anomalie de la perception des couleurs), ont été affectés aléatoirement à l'un des deux groupes. Tous les participants ont été testés dans des conditions expérimentales similaires. Chacun d'entre eux a été rencontré entre 8h et 9h30 le matin afin d'être soumis à une batterie de tests permettant de déterminer leurs différents seuils de sensibilité au contraste lumineux. Les participants du groupe expérimental ont ensuite été exposés à la lumière rouge pendant 3 minutes à l'aide des lunettes Eyepower Red, puis, après une période d'attente de 3 heures où les participants ont été libres de retourner à leurs activités personnelles, les capacités de perception des participants ont été mesurées une seconde fois afin de déterminer l'effet de l'exposition. Le groupe contrôle a été évalué de la même façon, seulement sans l'exposition à la lumière rouge, afin de pouvoir comparer les résultats entre les deux groupes et donc établir l'effet potentiel de l'exposition. La prise de mesure identique entre les deux groupes, à l'exception de l'intervention, permet d'isoler l'exposition à la lumière rouge comme seule variable ayant un effet sur les capacités visuelles visées. Puisque l'âge est une variable importante dans les résultats, les participants ont été équitablement répartis sur la plage d'âge proposée pour l'inclusion à l'expérimentation, afin de ne pas surreprésenter une partie de la population.

Groupe	Sexe	21-37 ans	38-63 ans	Total
Contrôle	F	7	4	11
	H	2	3	5
Expérimental	F	3	4	7
	H	5	4	9
	Total	17	15	32

1.2 Instruments

1.2.1 Tests visuels

Le premier test utilisé dans le cadre de cette thèse est le *Ishihara Color Test*. Ce test permet d'évaluer sommairement la présence d'une déficience de la vision de l'axe rouge-vert chez un individu (Birch, 1997). La version du test utilisé aux fins de cette étude comporte 17 planches sur lesquelles on retrouve un cercle constitué d'une mosaïque de plus petits cercles dont la couleur, la luminance et la taille varient. Dans la plupart des planches présentées, la disposition des cercles révèle un chiffre qui n'est pas le même pour les participants ayant une vision normale des couleurs et pour les participants présentant une déficience de la vision de l'axe vert-rouge. D'autres planches présentent pour leur part un chiffre qui est uniquement visible pour les personnes ayant une vision normale des couleurs ou à l'inverse, un chiffre qui est décelé uniquement par ceux ayant un déficit de la vision de l'axe rouge-vert. Les participants passent ce test dans une pièce éclairée par de la lumière naturelle ou artificielle, à une distance d'environ 70 cm.

Le deuxième test utilisé est le *Freiburg Visual Acuity and Contrast Test (FrACT)*. Ce test assisté par ordinateur permet de mesurer la sensibilité aux contrastes ainsi que l'acuité visuelle des participants (Bach, 2006). Ce test présente une série d'optotypes (anneaux de Landolt) dont la taille ou l'orientation varient en fonction de la condition mesurée en suivant une procédure dite « en escaliers ». Les optotypes diffèrent également selon quatre orientations différentes que le participant doit indiquer à l'aide de flèches sur un clavier. Ainsi, ce test permet de déterminer les seuils d'acuité visuelle et de sensibilité aux contrastes des participants. Les sujets doivent également se trouver à une distance d'environ 1.75 m de l'écran d'ordinateur pour effectuer ce test.

Le dernier test utilisé est le *Cambridge Colour Test (CCT)*. La version trivectorielle de ce test présenté sur un ordinateur fournit une évaluation des seuils de discrimination des axes de confusion protan, deutan et tritan selon le diagramme de chromaticité de la commission internationale des éclairages (CIE) (Goulart & al., 2008). Ces axes sont une mesure de la sensibilité des cônes à ondes longues, à ondes moyennes et à ondes courtes respectivement. Lors de ce test, on présente au sujet un cercle dans lequel se trouve une

cible en forme de C. Celle-ci se détache chromatiquement du reste de la figure. Le fond comme la cible sont formés de plusieurs pastilles dont la taille et la luminance diffèrent (voir Figure 5). Lors de la tâche, le sujet doit indiquer au moyen des flèches d'un clavier l'orientation de la cible qui peut varier aléatoirement selon quatre directions. Le contraste chromatique entre la cible et le fond est ajusté automatiquement entre chaque essai selon la performance du sujet en suivant une procédure en escaliers (staircase). De cette façon, il est possible d'obtenir une mesure quantitative précise des seuils de discrimination des trois axes de confusion des couleurs

1.2.2 Analyses

Une ANOVA à mesure répétée a été utilisée sur l'ensemble des 32 participants afin d'établir la variance intrasujet des résultats entre le premier temps et le deuxième, tout en prenant compte des facteurs intersujets du groupe d'âge et du groupe d'intervention.

Lorsque séparée en sous-groupe selon l'âge et le groupe d'intervention (expérimental et témoin), la distribution des données ne respecte pas la courbe de distribution normale, il est donc préférable d'utiliser un test non-paramétrique dans l'analyse des résultats. De plus, la nature de l'observation entre la mesure au premier temps et au deuxième temps nécessite d'analyser ces résultats par paires. Ainsi, un test de Wilcoxon apparié a été employé afin d'analyser la différence intra sujet avant et après l'intervention selon la division en sous-groupe d'âge et de groupe d'intervention.

RÉSULTATS

Par assignation aléatoire, les 32 participants se sont retrouvés répartis également entre le groupe contrôle et le groupe expérimental. Parmi ces 32 participants, 14 d'entre eux étaient des hommes, et 18 des femmes. Dans notre échantillon, 17 des participants sont âgés en dessous de 38 ans, et les 15 autres avaient 38 ans ou plus, ce qui constitue le point de séparation arbitraire entre « jeunes » et « vieux », relativement au vieillissement naturel de la rétine qui progresse plus rapidement vers cet âge (Shinmar et al., 2020a). Des tests T à échantillon indépendant ont été effectués pour la variable du sexe, de l'âge, l'heure du réveil ainsi que la consommation de café, afin de s'assurer de l'influence potentielle de ces variables sur la différence des scores mesurés entre le groupe expérimental et le groupe témoin. Seul l'âge présente un effet significatif sur les résultats des seuils de sensibilités, ce qui est cohérent avec la théorie du vieillissement naturel de la rétine, qui suppose que plus les participants sont vieux, plus leurs seuils de sensibilité devraient être élevés. Les tests T des autres variables n'ont pas révélé d'effet significatif, il n'est donc pas nécessaire de les contrôler dans le cadre de cette analyse.

D'après notre étude, l'exposition à la lumière rouge n'a pas d'influence significative sur les seuils de sensibilité aux contrastes lumineux. En effet, une seule exposition de 3 minutes à une lumière rouge de 670nm par les lunettes Eyepower Red a rapporté des résultats se situant presque toujours au-dessus du seuil de $p < 0.05$. Lorsque pris dans son ensemble, l'échantillon de 32 participants réparti également selon l'âge, le sexe et le groupe d'expérimentation permet d'utiliser un test paramétrique, malgré l'asymétrie positive de la distribution des résultats.

Afin de mesurer, d'une part, la variance des scores intrasujets, et de l'autre, la variance intersujet, une ANOVA à mesure répétée a été employée sur l'ensemble de l'échantillon, en utilisant le groupe d'expérimentation et le groupe d'âge comme facteur intersujet (contrôle/ expérimental, < 38 ans/ 38 ans et +). Ce test fût employé pour chacun des quatre seuils de sensibilités mesurés, soit l'axe protan, l'axe deutan, l'axe tritan et le contraste achromatique tel que mesuré par le FrACT. Pour l'axe protan, un effet simple du temps est observable sur la différence des scores de manière significative, lorsque les facteurs condition et âge sont pris en compte, toute interaction devient non-significative (voir Annexe C). Pour l'axe deutan, aucune interaction n'est significative, indépendamment de la combinaison de facteurs intersujets considérés ($p > 0.05$) (voir Annexe D). Pour l'axe tritan, une fois de plus, un effet simple du temps est

observable sur la différence des scores de manière significative, les diverses combinaisons des autres facteurs intersujet révèlent des effets non significatifs sur la différence des scores entre le premier temps et le deuxième (voir Annexe E). Pour la perception achromatique, aucune interaction n'est significative (Voir Annexe F).

Tableau 0.1 ANOVA à mesure répétée

Temps	Protan	Deutan	Tritan	FrACT
<i>Sig. (bilatérale)</i>	P = .006	P = .83	P = .001	P = .432
<i>F</i>	8.71	3.24	14.94	.636
<i>Éta-carré partielle</i>	.24	.104	.356	.022
Temps*âge	Protan	Deutan	Tritan	FrACT
<i>Sig. (bilatérale)</i>	P = .271	P = 0.122	P = .479	P = .590
<i>F</i>	1.263	2.545	.515	.296
<i>Éta-carré partielle</i>	.04	.083	.019	.010
Temps*condition	Protan	Deutan	Tritan	FrACT
<i>Sig. (bilatérale)</i>	.204	P = .732	P = .064	P = .713
<i>F</i>	1.689	.120	3.726	.138
<i>Éta-carré partielle</i>	.057	.004	.121	.005

<i>Temps*âge*condition</i>	Protan	Deutan	Tritan	FrACT
<i>Sig. (bilatérale)</i>	.240	P = .754	.305	P = .875
<i>F</i>	1.442	.100	1.095	.025
<i>Éta-carré partielle</i>	.049	.004	.039	.001

Pour l'axe protan, l'interaction significative entre le temps et la différence de score correspond à une diminution moyenne de 21% chez l'ensemble des participants, lorsque séparée en groupe contrôle et expérimental, cette diminution du seuil de sensibilité correspond respectivement à 28% et 14%. Pour l'axe tritan, l'interaction significative entre le temps et la différence de score correspond à une diminution moyenne de 38% chez l'ensemble des participants, lorsque séparée en groupe contrôle et expérimental, cette diminution du seuil de sensibilité est de l'ordre de 56% et 20% respectivement.

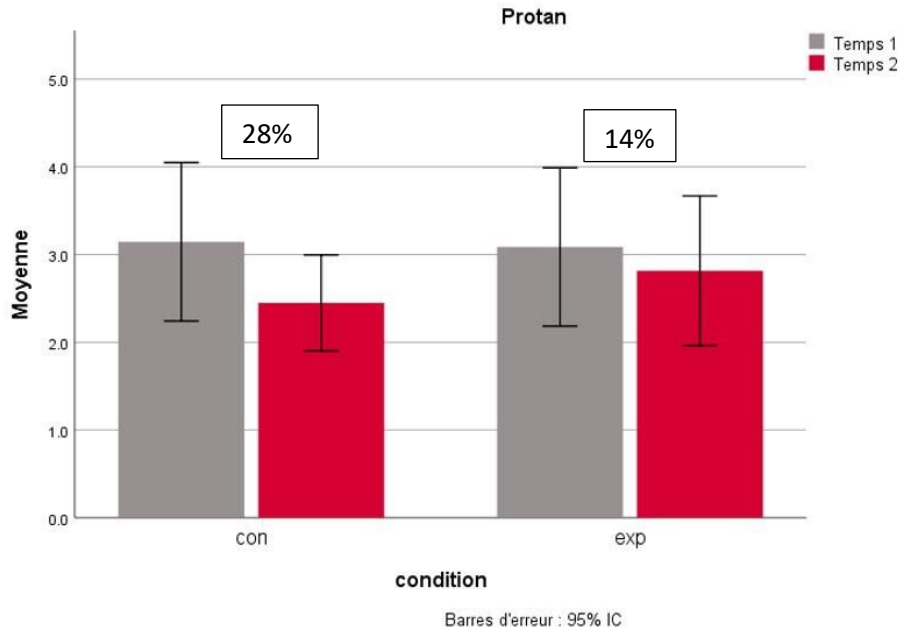


Figure 1. Sensibilité aux contrastes de l'axe protan au temps 1 et au temps 2 chez les participants du groupe contrôle et expérimental. Une diminution de 28% est observable pour le groupe contrôle, $p = 0.006$. Une diminution de 14% est observable pour le groupe expérimental, $p = 0.006$. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95%.

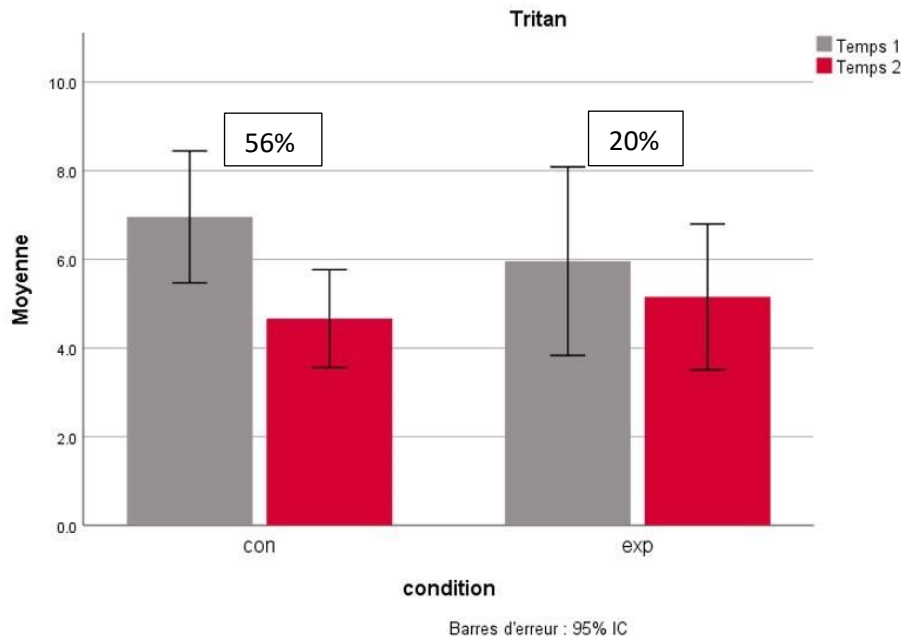


Figure 2. Sensibilité aux contrastes de l'axe tritan au temps 1 et au temps 2 chez 31 participants du groupe contrôle et expérimental. Une diminution de 56% est observable pour le groupe contrôle, $p = 0.006$. Une diminution de 20% est observable pour le groupe expérimental, $p = 0.001$. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95%.

L'ANOVA effectuée sur l'ensemble des participants ne révèle pas d'interaction significative en fonction du temps entre le groupe contrôle et expérimental. Puisque notre étude tente de reproduire celle menée par Shinhmar et al., il nous faut étudier l'effet de l'exposition à la lumière rouge spécifiquement sur les participants de 38 ans et plus du groupe expérimental et les comparer aux autres sous-groupes. Afin d'analyser les participants en fonction de leur âge et de leur groupe d'expérimentation respectif, il fut nécessaire d'employer un test non paramétrique, puisque la distribution des données ne suivait pas la courbe normale pour chaque sous-groupe. Ainsi, à l'aide d'un test Wilcoxon à échantillon apparié, il est possible d'observer une diminution significative ($p = 0.015$) chez les jeunes du groupe contrôle pour le seuil de détection de l'axe protan et de l'axe tritan, à raison de 33% et 45% respectivement. Cependant, les jeunes du groupe expérimental ont aussi démontré une diminution significative de 31% ($p = 0.05$) de leur seuil de l'axe tritan, ce qui constitue l'unique résultat significatif du groupe expérimental selon tous les tests employés. Finalement, nous avons observé une diminution de 71% du seuil de sensibilité des 38 ans et plus du groupe contrôle quant à l'axe tritan ($p = 0.018$). Tout autre résultat s'est avéré non significatif.

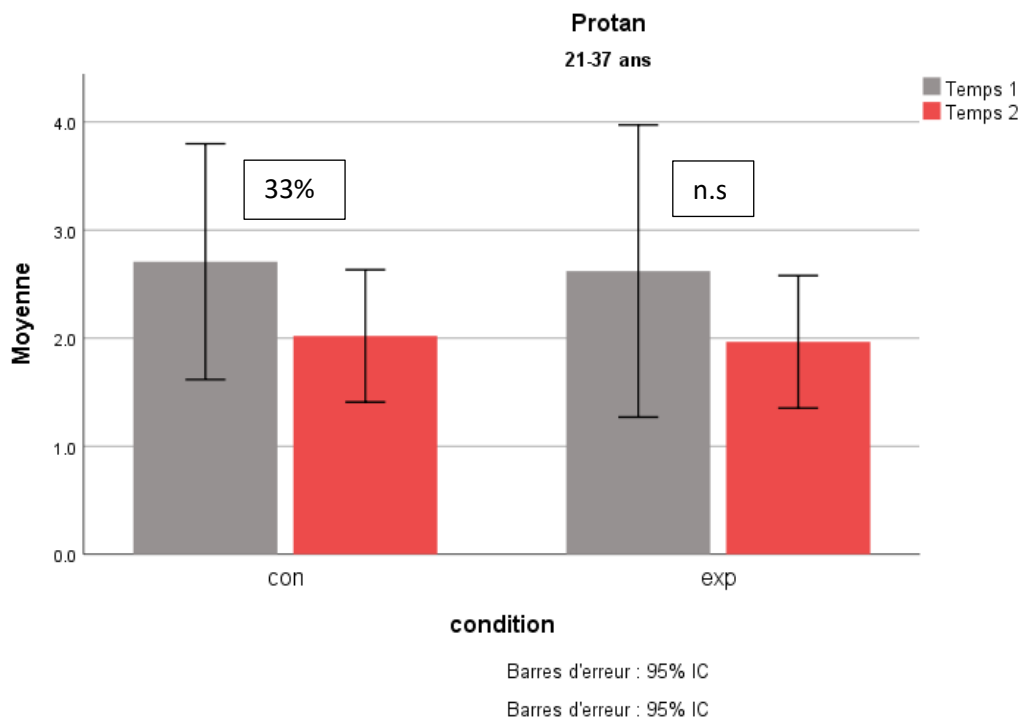


Figure 3. Sensibilité aux contrastes de l'axe protan au temps 1 et au temps 2 des 17 participants de 37 ans et moins du groupe contrôle et expérimental. Une diminution de 33% est observable pour le groupe contrôle, $p = 0.015$. La diminution du groupe expérimental n'est pas significative, $p = 0.069$. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95%.

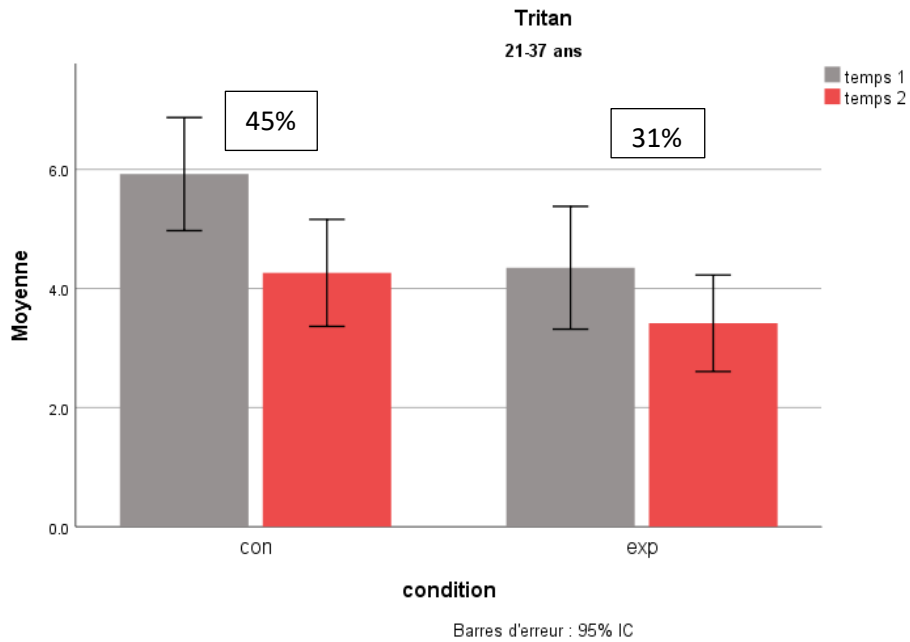


Figure 4. Sensibilité aux contrastes de l'axe tritan au temps 1 et au temps 2 des 17 participants de 37 ans et moins du groupe contrôle et expérimental. Une diminution de 45% est observable pour le groupe contrôle, $p = 0.015$. Une diminution significative de 31% est observable pour le groupe expérimental, $p = 0.05$. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95%.

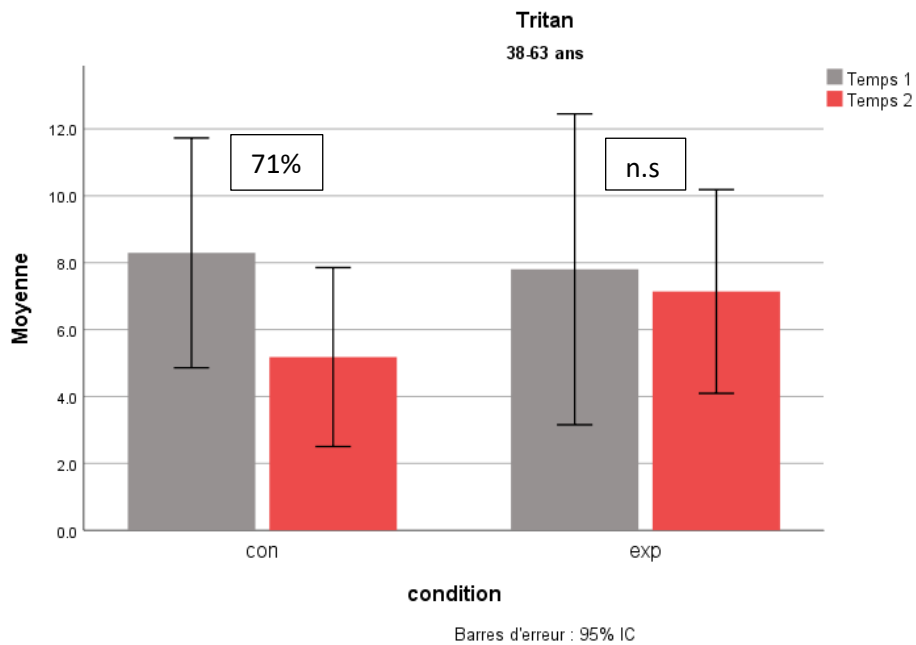


Figure 5. Sensibilité aux contrastes de l'axe tritan au temps 1 et au temps 2 des 14 participants de 38 ans et plus du groupe contrôle et expérimental. Une diminution de 71% est observable pour le groupe contrôle, $p = 0.018$. La

diminution du groupe expérimental n'est pas significative, $p > 0.866$. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95%.

DISCUSSION

Les résultats de l'étude contredisent les études menées par Shihmar et al. Tout d'abord, les résultats suggèrent qu'il n'y a pas d'effet significatif d'une brève exposition à la lumière rouge sur les fonctions visuelles, à part potentiellement sur le seuil de sensibilité de l'axe tritan des moins de 38 ans. De plus, la plupart des résultats significatifs sont observables uniquement chez le groupe contrôle. Le fait qu'il y ait un effet significatif chez les jeunes du groupe contrôle sur l'axe protan et tritan suggère qu'il y ait une ou plusieurs variables dont l'influence n'est pas prise en compte dans les deux groupes. Il est entre autres probable qu'un effet de pratique soit responsable d'une différence significative des résultats des participants. De plus, le fait que les 38 ans et plus n'ont pratiquement aucun résultat statistiquement significatif va directement à l'opposé des résultats des études sur lesquelles celle-ci s'est inspirée. En effet, les deux études conduites par Shihmar et al. ont suggéré, conformément à la théorie du vieillissement de la rétine, que les personnes plus vieilles seraient plus susceptibles à une amélioration de leur performance après une exposition à la lumière rouge. Logiquement, les participants de 38 ans et plus devraient avoir une amélioration supérieure à celle des jeunes, dont la rétine est assumée être en santé. Dans notre étude, le groupe expérimental de participants âgés de 38 et 63 ans ne rapporte aucun effet significatif selon les quatre variables mesurées, et donc potentiellement aucun effet significatif de l'exposition à la lumière rouge. À l'inverse, la majorité des résultats significatifs se retrouvent chez les jeunes, indépendamment de leur groupe. De plus, pris dans son ensemble grâce à l'ANOVA à mesure répétée, seul le temps exerce une influence sur la différence de résultats entre la mesure prise le matin et la mesure prise trois heures plus tard. Dès que le facteur inter sujet « condition » (contrôle vs expérimental) est considéré dans les calculs, toute interaction significative disparaît. Tous les résultats observés dans cette étude pointent vers un rejet de notre hypothèse sur l'effet d'une exposition à la lumière rouge sur les fonctions visuelles.

Il demeure tout de même important de nuancer l'interprétation de nos résultats. Tout d'abord, l'échantillon de seulement 32 participants représente une faiblesse statistique potentielle pouvant influencer sur la validité des résultats. De plus, une fois divisé en sous-groupe d'intérêt, chacun des quatre échantillons contient entre 7 et 9 participants, ce qui amplifie l'impact à la robustesse des analyses, comme démontré par l'intervalle de confiance des graphiques (voir figure 3,4 et 5). L'interprétation des résultats, particulièrement pour le test de Wilcoxon, doit être effectuée avec réserve. Les résultats de ce test non

paramétrique servent ici d'indication potentielle d'un effet qui mériterait d'être étudié sur un plus gros échantillon de participants, et non à titre de conclusion définitive. Ensuite, certaines variables n'ont pas pu être contrôlées dans le cadre de cette étude. Malgré le critère de sélection demandant qu'il n'y ait aucun diagnostic de condition pouvant affecter la perception des couleurs chez les participants, il est possible que certains d'entre eux ne soient pas conscients d'une telle condition. La dégénérescence maculaire est entre autres une des conditions qui n'a pas été contrôlée ici. De plus, l'intervalle de trois heures entre les deux prises de mesure n'était pas contrôlé; chaque participant était libre de faire ce qu'il voulait. Un temps d'étude devant un ordinateur pendant 3 heures, par exemple, pourrait potentiellement avoir un impact sur les fonctions visuelles. Les limites de ressources, que ce soit de temps, de personnel ou d'équipement, rendaient non réaliste la prise en considération de telles variables.

Il est aussi important de noter qu'aucune mesure de contrôle n'a été effectuée afin d'établir l'importance du moment d'exposition. La littérature existante spécifiait que la mitochondrie serait susceptible à l'absorption des photons de la lumière rouge uniquement le matin, potentiellement dû au rythme circadien de la cellule. Nous nous sommes basés sur cette théorie afin d'établir les paramètres méthodologiques de notre intervention. Considérant l'ambivalence de nos résultats, il serait intéressant de conduire une étude supplémentaire sur la nature du mécanisme du cycle d'absorption de lumière de la mitochondrie en exposant plusieurs cohortes à une lumière rouge à différents moments de la journée.

Malgré tout, certaines forces permettent de justifier les résultats ci-haut présentés. Tout d'abord, la présence d'un groupe contrôle permet de directement comparer l'influence de l'exposition à la lumière rouge sur les fonctions visuelles, renforçant la validité interne de l'étude. De la même manière, la prise de mesure en deux temps pour chaque participant permet d'inclure une validité intra sujet, puisque les comparaisons de moyennes ne se font pas uniquement entre les participants, mais entre chaque résultat de ceux-ci.

Une différence importante de notre étude est qu'elle considère les performances selon un modèle différent des études appuyant les lunettes Eyepower. Alors que les études conduites par l'équipe de chercheurs de l'UCL se base sur un système d'axe protan rouge-vert et axe tritan bleu-jaune, notre étude mesure séparément l'axe protan, l'axe deutan et l'axe tritan, pouvant grossièrement être décrits comme les axes de perception du rouge, vert et bleu respectivement. Puisque spécifiquement le seuil de sensibilité de l'axe deutan n'a connu aucun changement significatif dans nos analyses, cela pourrait expliquer la plus

grande importance de nos variations de résultat, qui vont jusqu'à une diminution de 71%, alors que les études précédentes rapportaient des réductions dans l'ordre de 20%. L'exclusion de l'axe deutan comme mesure indépendante pourrait donc avoir un effet d'atténuation sur leur résultat. Même si les résultats n'ont dans ce cas-ci pas été significatifs, cela constitue un apport à la littérature qui n'était auparavant pas observé.

La fidélité de la reproduction des études de Shihmar et al. permet aussi de soulever des questions sur la différence des résultats. Notre étude et la plus récente de Shihmar et al. ont été conduites sur des échantillons de taille similaire, avec des sous-groupes comparables et selon les mêmes paramètres d'intervention. Les participants étaient tous testés une fois le matin, puis une deuxième fois 3 heures plus tard. Cependant, les tests utilisés afin de mesurer les seuils de sensibilité des participants diffèrent. Cela pourrait constituer une explication alternative de nos résultats. L'étendue de l'échantillon est aussi différente. Alors que notre étude comporte 16 participants dans le groupe expérimental, l'âge s'étend de 21 à 63 ans. Dans l'étude menée par les chercheurs de l'UCL, les 20 participants se situaient au-dessus de 38 ans d'âge, ce qui se traduit donc par une moins grande variance des résultats.

Dans ce cas-ci, et surtout considérant l'importance des résultats du groupe témoin dans notre interprétation, celui-ci constitue une force importante de notre étude. Un échantillon de 16 participants pour les deux groupes permet de mieux comparer la variance des résultats avec et sans exposition à la lumière rouge. Cela renforce d'autant plus la validité de nos observations.

Une question émerge de ces résultats; comment expliquer que, à l'exception du seuil de sensibilité de l'axe tritan des jeunes du groupe expérimental, seul le groupe contrôle rapporte une amélioration significative? Si un effet de pratique était bel et bien présent, le groupe expérimental y serait aussi sujet, on pourrait donc aussi y observer des améliorations significatives. Considérant la variance de nos résultats, il ne serait pas judicieux de faire des interprétations hâtives quant à la nature de ces observations. Un plus grand échantillon des deux groupes d'âge permettrait d'observer plus clairement l'influence d'un effet de pratique dans ce contexte. Si notre étude permet de tirer quelques conclusions importantes, c'est d'abord qu'il est encore nécessaire d'approfondir la littérature et les études sur ce sujet encore bien méconnu. Alors que les études précédentes rapportent des effets prometteurs pour l'application clinique d'un tel produit, les mécanismes d'absorption restent encore sans étude offrant une explication solide.

Ensuite, en se fiant à nos résultats, il est tout de même possible de conclure que l'exposition à la lumière rouge n'a pas d'influence significative sur le seuil de sensibilité aux contrastes chromatique et achromatique. De plus, notre étude apporte à la littérature dans le fait qu'un effet de pratique est définitivement possible lors de la passation de test. Ainsi, les études suivantes devraient s'assurer de contrôler ce facteur, qui a exercé une influence importante dans nos résultats.

CONCLUSION

En conclusion, cette recherche permet d'ouvrir de nouvelles pistes de réflexion sur les effets d'une exposition à la lumière rouge sur les fonctions visuelles. Tout d'abord, il serait particulièrement pertinent d'entreprendre une expérimentation similaire sur un plus grand échantillon de participant, ce qui n'a toujours pas été fait à ce jour. Une telle démarche permettrait d'atténuer l'importance des variances entre les sujets. Ensuite, de nouvelles méthodes de contrôle pour l'effet de pratique devraient être implantées lors de la passation des tests psychophysiques, considérant l'influence que cet effet apporte aux résultats. De plus, un phénomène de sélectivité cyclique d'absorption de la lumière chez la mitochondrie n'a pas pu être décelé lors de notre prise de données. Les mécanismes d'absorptions lumineuses sont peut-être régis par un autre facteur biologique et devraient être étudiés plus profondément avant d'en assumer le fonctionnement. L'omniprésence des écrans dans la vie quotidienne de l'humain le rend aujourd'hui plus dépendant de l'efficacité de leurs cônes que jamais. Alors que les bâtonnets de la rétine sont moins sollicités qu'auparavant, la possibilité de ralentir le vieillissement des cônes de la rétine implique des retombées importantes pour le quotidien de la population vieillissante. C'est pourquoi, malgré les résultats contradictoires de notre étude face à la littérature précédente, il est nécessaire de démystifier les effets potentiels de la lumière rouge sur les fonctions visuelles en multipliant les recherches à ce sujet.

ANNEXE A
APPROBATION DU COMITÉ D'ÉTHIQUE

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

Le Comité d'éthique de la recherche pour les projets étudiants impliquant des êtres humains (CERPE FSH) a examiné le projet de recherche suivant et le juge conforme aux pratiques habituelles ainsi qu'aux normes établies par la *Politique No 54 sur l'éthique de la recherche avec des êtres humains* (avril 2020) de l'UQAM.

Titre du projet : Effet d'une brève exposition à la lumière rouge sur la sensibilité visuelle

Nom de l'étudiant : Marc-Antoine Lourmède

Programme d'études : Baccalauréat en Psychologie (6589)

Direction(s) de recherche : Dave Saint-Amour

Modalités d'application

Toute modification au protocole de recherche en cours de même que tout événement ou renseignement pouvant affecter l'intégrité de la recherche doivent être communiqués rapidement au comité.

La suspension ou la cessation du protocole, temporaire ou définitive, doit être communiquée au comité dans les meilleurs délais.

Le présent certificat est valide pour une durée d'un an à partir de la date d'émission. Au terme de ce délai, un rapport d'avancement de projet doit être soumis au comité, en guise de rapport final si le projet est réalisé en moins d'un an, et en guise de rapport annuel pour le projet se poursuivant sur plus d'une année au plus tard un mois avant la date d'échéance **(2024-01-18)** de votre certificat. Dans ce dernier cas, le rapport annuel permettra au comité de se prononcer sur le renouvellement du certificat d'approbation éthique.



Sylvie Lévesque
Professeure, Département de sexologie
Présidente du CERPE FSH

ANNEXE B

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

Titre du projet de recherche : *Effet d'une brève exposition à la lumière rouge sur la sensibilité visuelle*

Étudiant chercheur : Marc-Antoine Lourmède, Université du Québec à Montréal
Directeur : Dave Saint-Amour, Ph.D., Université du Québec à Montréal

Préambule

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche.

Avant d'accepter de participer à ce projet et de signer ce formulaire, il est important de prendre le temps de lire et de bien comprendre les renseignements ci-dessous. S'il y a des mots ou des sections que vous ne comprenez pas ou qui ne semblent pas clairs, n'hésitez pas à nous à poser des questions ou à communiquer avec la responsable du projet ou le directeur de recherche.

Objectifs du projet

L'objectif de la recherche est d'évaluer la perception visuelle à partir d'un test informatisé chez des adultes âgés entre 20 et 65 ans à la suite d'une exposition à la lumière rouge via les lunettes Eyepower Red; une paire de lunettes commercialisée par la firme Eyepower permettant d'exposer directement et sécuritairement la rétine à la lumière rouge. Pour évaluer la perception visuelle, la même batterie de tests de perception des contrastes sera administrée au même échantillon homogène de 20 participants âgés de 20 à 65 ans avant et après l'exposition. Ainsi, les données pourront être comparées afin de quantifier l'amélioration potentielle de la perception visuelle chez les participant.e.s.

Nature de la participation

L'ensemble des tâches s'effectuera en deux séances dans le laboratoire de Dave Saint-Amour. Tout d'abord, vous aurez à répondre à un formulaire qui vous demandera d'inscrire votre nom, prénom, adresse courriel, âge et sexe. Par la suite, vous aurez à compléter trois tests visuels. Ceux-ci servent à évaluer : votre sensibilité au contraste, votre vision des couleurs et votre capacité à différencier les couleurs. Si vous êtes dans le groupe expérimental, vous recevrez une seule exposition de 3 min à la lumière rouge en portant les lunettes Eyepower Red. Finalement, les mêmes tests visuels seront à compléter une deuxième fois environ 3 heures suivant le traitement. Vous serez libre de retourner à vos occupations personnelles pendant le 3 heures d'attente. Il faut compter environ 15 minutes pour l'ensemble des procédures pour chacune des deux séances.

Critères de participation

- être âgé-e-s de 20 à 65 ans.
- être une personne avec une vision normale des couleurs.
- être exempt-e-s de troubles neurologiques et psychiatriques.
- ne pas être sous médication.

Avantages

La participation au projet de recherche pourrait possiblement permettre le dépistage d'anomalies visuelles de la perception des couleurs chez certaines personnes. Pour les participant.e.s ayant une vision normale des couleurs, la participation au projet pourrait potentiellement améliorer temporairement la sensibilité au contraste lumineux. De plus, les données recueillies vont permettre l'avancement des connaissances dans le domaine de la fonction visuelle.

Risques et inconvénients

En participant à cette recherche, il est possible que vous ressentiez une légère fatigue visuelle durant les tests sur ordinateur. Des temps de repos vous seront proposés entre chaque test si vous en ressentez le besoin. Le temps nécessaire à votre déplacement et à la participation peut aussi représenter un inconvénient. L'horaire des séances sera fait en fonction de vous accommoder le plus possible. À la suite des tests, il est possible qu'une anomalie de la perception des couleurs soit décelée chez certains participants. Il vous est conseillé de consulter votre optométricien habituel traitant pour obtenir davantage d'information ainsi qu'un suivi adéquat de votre condition. Si vous ne possédez pas d'optométricien traitant, vous serez dirigé vers l'OQAM pour effectuer un suivi. La prise de conscience d'une anomalie pourrait peut-être susciter une réaction émotive chez certaines personnes, résultant à un arrêt de la séance. Notez qu'il est toujours possible d'arrêter la séance. En cas de malaise psychologique, vous serez référé au Centre d'écoute et de référence Halte Ami.

OQAM

Téléphone : (514) 982-0775

Adresse : 375 rue Ste-Catherine Est, Montréal (Québec), H2X 3X2

Halte Ami

Téléphone : (514) 987-8509

Adresse : 1259 rue Berri, Local 10, Montréal (Québec) H3C 3P8

Compensation

Une compensation financière de 10 \$ vous sera offerte à la fin de la séance.

Confidentialité

Tous les renseignements recueillis sont confidentiels. Seul le chercheur principal y aura accès. Votre formulaire de consentement et les formulaires sur papier seront conservés dans un classeur verrouillé pour toute la durée du projet. Les fichiers informatiques contenant vos résultats aux tests visuels seront consignés et conservés dans un ordinateur protégé par un mot de passe. Tous les renseignements permettant votre identification seront supprimés de façon sécuritaire à la fin du projet. Vos résultats aux tests ainsi que les données ne permettant pas votre identification seront gardés 5 ans après la fin du projet, ils seront ensuite détruits. Vous êtes libre de refuser que vos données soient conservées pendant cette période.

- J'accepte que mes données puissent être conservées au terme du projet
- Je refuse que mes données puissent être conservées au terme du projet

Participation volontaire et droit de retrait

Votre participation à ce projet est volontaire. Cela signifie que vous acceptez de participer au projet sans aucune contrainte ou pression extérieure. Cela signifie également que vous êtes libre de mettre fin à votre participation en tout temps au cours de cette recherche, sans préjudice de quelque nature que ce soit, et sans avoir à vous justifier. Dans ce cas, et à moins d'une directive verbale ou écrite contraire de votre part, les documents, renseignements et données vous concernant seront détruits.

Responsabilité

En acceptant de participer à ce projet, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs ou l'institution impliquée (ou les institutions impliquées) de leurs obligations civiles et professionnelles.

Personnes-ressources :

Vous pouvez contacter la responsable du projet au numéro (514) 701-1361 pour des questions additionnelles sur le projet. Vous pouvez discuter avec elle, ou le directeur du projet au numéro (514) 987-3000 poste 7698 des conditions dans lesquelles se déroule votre participation.

Le Comité d'éthique de la recherche de la Faculté des sciences humaines pour les projets étudiants (CERPÉ FSH) a approuvé ce projet et en assure le suivi. Pour toute information ou question concernant vos droits en tant que participant à ce projet de recherche ou si vous avez des plaintes à formuler vous pouvez communiquer avec le Comité au numéro 987-3000 poste 3642.

Remerciements : Votre collaboration est importante à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier. Si vous souhaitez obtenir un résumé écrit des principaux résultats de cette recherche, veuillez ajouter vos coordonnées ci-dessous.

ANNEXE C

RÉSULTATS DE L'ANOVA À MESURE RÉPÉTÉE DE L'AXE PROTAN

Tests des effets intrasujets

Mesure: MEASURE_1

Source		Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification	Eta-carré partiel	Paramètre Paramètre	Puissance observée ^a
temps	Hypothèse de sphéricité	3.745	1	3.745	8.715	.006	.237	8.715	.813
	Greenhouse- Geisser	3.745	1.000	3.745	8.715	.006	.237	8.715	.813
	Huynh-Feldt	3.745	1.000	3.745	8.715	.006	.237	8.715	.813
	Borne inférieure	3.745	1.000	3.745	8.715	.006	.237	8.715	.813
temps * condition	Hypothèse de sphéricité	.726	1	.726	1.689	.204	.057	1.689	.241
	Greenhouse- Geisser	.726	1.000	.726	1.689	.204	.057	1.689	.241
	Huynh-Feldt	.726	1.000	.726	1.689	.204	.057	1.689	.241
	Borne inférieure	.726	1.000	.726	1.689	.204	.057	1.689	.241
temps * âgevj	Hypothèse de sphéricité	.543	1	.543	1.263	.271	.043	1.263	.192
	Greenhouse- Geisser	.543	1.000	.543	1.263	.271	.043	1.263	.192
	Huynh-Feldt	.543	1.000	.543	1.263	.271	.043	1.263	.192
	Borne inférieure	.543	1.000	.543	1.263	.271	.043	1.263	.192
temps * condition * âgevj	Hypothèse de sphéricité	.620	1	.620	1.442	.240	.049	1.442	.213

	Greenhouse-Geisser	.620	1.000	.620	1.442	.240	.049	1.442	.213
	Huynh-Feldt	.620	1.000	.620	1.442	.240	.049	1.442	.213
	Borne inférieure	.620	1.000	.620	1.442	.240	.049	1.442	.213
Erreur (temps)	Hypothèse de sphéricité	12.032	28	.430					
	Greenhouse-Geisser	12.032	28.000	.430					
	Huynh-Feldt	12.032	28.000	.430					
	Borne inférieure	12.032	28.000	.430					

Calcul à l'aide d'alpha = .05

ANNEXE D

RÉSULTATS DE L'ANOVA À MESURE RÉPÉTÉE DE L'AXE DEUTAN

Tests des effets intrasujets

Mesure: MEASURE_1

Source		Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification	Eta-carré partiel	Paramètre Paramètre	Puissance observée ^a
temps	Hypothèse de sphéricité	.648	1	.648	1.992	.170	.069	1.992	.275
	Greenhouse-Geisser	.648	1.000	.648	1.992	.170	.069	1.992	.275
	Huynh-Feldt	.648	1.000	.648	1.992	.170	.069	1.992	.275
	Borne inférieure	.648	1.000	.648	1.992	.170	.069	1.992	.275
temps * sexe	Hypothèse de sphéricité	.038	1	.038	.118	.734	.004	.118	.063
	Greenhouse-Geisser	.038	1.000	.038	.118	.734	.004	.118	.063
	Huynh-Feldt	.038	1.000	.038	.118	.734	.004	.118	.063
	Borne inférieure	.038	1.000	.038	.118	.734	.004	.118	.063
temps * condition	Hypothèse de sphéricité	.056	1	.056	.171	.682	.006	.171	.068
	Greenhouse-Geisser	.056	1.000	.056	.171	.682	.006	.171	.068
	Huynh-Feldt	.056	1.000	.056	.171	.682	.006	.171	.068
	Borne inférieure	.056	1.000	.056	.171	.682	.006	.171	.068
temps * âgevj	Hypothèse de sphéricité	.786	1	.786	2.414	.132	.082	2.414	.323
	Greenhouse-Geisser	.786	1.000	.786	2.414	.132	.082	2.414	.323
	Huynh-Feldt	.786	1.000	.786	2.414	.132	.082	2.414	.323
	Borne inférieure	.786	1.000	.786	2.414	.132	.082	2.414	.323

temps * condition * âgevj	Hypothèse de sphéricité	.020	1	.020	.061	.807	.002	.061	.057
	Greenhouse-Geisser	.020	1.000	.020	.061	.807	.002	.061	.057
	Huynh-Feldt	.020	1.000	.020	.061	.807	.002	.061	.057
	Borne inférieure	.020	1.000	.020	.061	.807	.002	.061	.057
Erreur (temps)	Hypothèse de sphéricité	8.788	27	.325					
	Greenhouse-Geisser	8.788	27.000	.325					
	Huynh-Feldt	8.788	27.000	.325					
	Borne inférieure	8.788	27.000	.325					

a. Calcul à l'aide d'alpha = .05

ANNEXE E
RÉSULTATS DE L'ANOVA À MESURE RÉPÉTÉE DE L'AXE TRITAN

Tests des effets intrasujets

Mesure: MEASURE_1

Source		Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification	Eta-carré partiel	Paramètre Paramètre	Puissance observée ^a
temps	Hypothèse de sphéricité	38.829	1	38.829	14.939	.001	.356	14.939	.961
	Greenhouse-Geisser	38.829	1.000	38.829	14.939	.001	.356	14.939	.961
	Huynh-Feldt	38.829	1.000	38.829	14.939	.001	.356	14.939	.961
	Borne inférieure	38.829	1.000	38.829	14.939	.001	.356	14.939	.961
temps * âgevj	Hypothèse de sphéricité	1.339	1	1.339	.515	.479	.019	.515	.106
	Greenhouse-Geisser	1.339	1.000	1.339	.515	.479	.019	.515	.106
	Huynh-Feldt	1.339	1.000	1.339	.515	.479	.019	.515	.106
	Borne inférieure	1.339	1.000	1.339	.515	.479	.019	.515	.106
temps * condition	Hypothèse de sphéricité	9.684	1	9.684	3.726	.064	.121	3.726	.461
	Greenhouse-Geisser	9.684	1.000	9.684	3.726	.064	.121	3.726	.461
	Huynh-Feldt	9.684	1.000	9.684	3.726	.064	.121	3.726	.461
	Borne inférieure	9.684	1.000	9.684	3.726	.064	.121	3.726	.461
temps * âgevj * condition	Hypothèse de sphéricité	2.846	1	2.846	1.095	.305	.039	1.095	.172
	Greenhouse-Geisser	2.846	1.000	2.846	1.095	.305	.039	1.095	.172
	Huynh-Feldt	2.846	1.000	2.846	1.095	.305	.039	1.095	.172
	Borne inférieure	2.846	1.000	2.846	1.095	.305	.039	1.095	.172
Erreur (temps)	Hypothèse de sphéricité	70.180	27	2.599					
	Greenhouse-Geisser	70.180	27.000	2.599					

Huynh-Feldt	70.180	27.000	2.599					
Borne inférieure	70.180	27.000	2.599					

a. Calcul à l'aide d'alpha = .05

ANNEXE F

RÉSULTATS DE L'ANOVA À MESURE RÉPÉTÉE DU FRACT

Tests des effets intrasujets

Mesure: MEASURE_1

Source		Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification	Eta-carré partiel	Paramètre Paramètre	Puissance observée ^a
temps	Hypothèse de sphéricité	.086	1	.086	.636	.432	.022	.636	.120
	Greenhouse-Geisser	.086	1.000	.086	.636	.432	.022	.636	.120
	Huynh-Feldt	.086	1.000	.086	.636	.432	.022	.636	.120
	Borne inférieure	.086	1.000	.086	.636	.432	.022	.636	.120
temps * condition	Hypothèse de sphéricité	.019	1	.019	.138	.713	.005	.138	.065
	Greenhouse-Geisser	.019	1.000	.019	.138	.713	.005	.138	.065
	Huynh-Feldt	.019	1.000	.019	.138	.713	.005	.138	.065
	Borne inférieure	.019	1.000	.019	.138	.713	.005	.138	.065
temps * âgevj	Hypothèse de sphéricité	.040	1	.040	.296	.590	.010	.296	.082
	Greenhouse-Geisser	.040	1.000	.040	.296	.590	.010	.296	.082
	Huynh-Feldt	.040	1.000	.040	.296	.590	.010	.296	.082

	Borne inférieure	.040	1.000	.040	.296	.590	.010	.296	.082
temps * condition * âgevj	Hypothèse de sphéricité	.003	1	.003	.025	.875	.001	.025	.053
	Greenhouse-Geisser	.003	1.000	.003	.025	.875	.001	.025	.053
	Huynh-Feldt	.003	1.000	.003	.025	.875	.001	.025	.053
	Borne inférieure	.003	1.000	.003	.025	.875	.001	.025	.053
Erreur (temps)	Hypothèse de sphéricité	3.803	28	.136					
	Greenhouse-Geisser	3.803	28.000	.136					
	Huynh-Feldt	3.803	28.000	.136					
	Borne inférieure	3.803	28.000	.136					

a. Calcul à l'aide d'alpha = .05

ANNEXE G
RÉSULTATS DU WILCOXON À ÉCHANTILLON APPARIÉ

			Tests statistiques^a			FraCT2% - FraCT1%
âgej	condition		c2-Pm - c1-Pm	c2-Dm - c1-Dm	c2-Tm - c1-Tm	
jeune	con	Z	-2.429 ^b	-.652 ^b	-2.429 ^b	-.296 ^b
		Sig. asymptotique (bilatérale)	.015	.515	.015	.767
	exp	Z	-1.820 ^b	-.560 ^b	-1.960 ^b	-1.123 ^b
		Sig. asymptotique (bilatérale)	.069	.575	.050	.261
vieux	con	Z	-1.183 ^b	-1.014 ^b	-2.366 ^b	-.169 ^c
		Sig. asymptotique (bilatérale)	.237	.310	.018	.866
	exp	Z	-.140 ^c	-.980 ^b	-.169 ^b	-.280 ^b
		Sig. asymptotique (bilatérale)	.889	.327	.866	.779

- a. Test de classement de Wilcoxon
- b. Basée sur les rangs positifs.
- c. Basée sur les rangs négatifs.

BIBLIOGRAPHIE

- Begum, R., Powner, M. B., Hudson, N., Hogg, C. et Jeffery, G. (2013). Treatment with 670 nm Light Up Regulates Cytochrome C Oxidase Expression and Reduces Inflammation in an Age-Related Macular Degeneration Model. *PLOS ONE*, 8(2), e57828. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057828>
- Cunea, A. et Jeffery, G. (2007). The ageing photoreceptor. *Visual Neuroscience*, 24(2), 151-155. <https://doi.org/10.1017/S0952523807070204>
- Hamblin, M. R. (2016). Shining light on the head: Photobiomodulation for brain disorders. *BBA Clinical*, 6, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.bbacli.2016.09.002>
- Kam, J. H., Weinrich, T. W., Sangha, H., Powner, M. B., Fosbury, R. et Jeffery, G. (2019). Mitochondrial absorption of short wavelength light drives primate blue retinal cones into glycolysis which may increase their pace of aging. *Visual Neuroscience*, 36, E007. <https://doi.org/10.1017/S0952523819000063>
- Osborne, N. N., Núñez-Álvarez, C., Del Olmo-Aguado, S. et Merrayo-Lloves, J. (2017). Visual light effects on mitochondria: The potential implications in relation to glaucoma. *Mitochondrion*, 36, 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.mito.2016.11.009>
- Shinhmar, H., Grewal, M., Sivaprasad, S., Hogg, C., Chong, V., Neveu, M. et Jeffery, G. (2020). Optically Improved Mitochondrial Function Redeems Aged Human Visual Decline. *The Journals of Gerontology: Series A*, 75(9), e49-e52. <https://doi.org/10.1093/gerona/glaa155>
- Shinhmar, H., Hogg, C., Neveu, M. et Jeffery, G. (2021). Weeklong improved colour contrasts sensitivity after single 670 nm exposures associated with enhanced mitochondrial function. *Scientific Reports*, 11(1), 22872. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02311-1>
- Sommer, A. P. (2019). Mitochondrial cytochrome c oxidase is not the primary acceptor for near infrared light—it is mitochondrial bound water: the principles of low-level light therapy. *Annals of Translational Medicine*, 7(Suppl 1), S13. <https://doi.org/10.21037/atm.2019.01.43>
- Sommer, A. P., Haddad, M. Kh. et Fecht, H.-J. (2015). Light Effect on Water Viscosity: Implication for ATP Biosynthesis | *Scientific Reports*. <https://www.nature.com/articles/srep12029>
- Weinrich, T. W., Kam, J. H., Ferrara, B. T., Thompson, E. P., Mitrofanis, J. et Jeffery, G. (2019). A day in the life of mitochondria reveals shifting workloads. *Scientific Reports*, 9(1), 13898. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48383-y>
- Weinrich, T. W., Powner, M. B., Lynch, A., Jonnal, R. S., Werner, J. S. et Jeffery, G. (2017). No evidence for loss of short-wavelength sensitive cone photoreceptors in normal ageing of the primate retina. *Scientific Reports*, 7(1), 46346. <https://doi.org/10.1038/srep46346>