

Université Paris Descartes

Ecole doctorale 566 « Sciences du sport, de la motricité et du Mouvement humain »

Laboratoire de Physiopathologie de la vision et de la motricité binoculaire

Groupe IRIS, FR 3636 / CNRS, Université Paris V

Dysfonctionnements de la synergie vergence et accommodation chez les jeunes adultes : impact sur les saccades, la lecture et la cognition

Par François DANIEL

Thèse de doctorat de Sciences
(Neurosciences et Contrôle du mouvement)

Dirigée par Zoï KAPOULA

Présentée et soutenue publiquement le 06 Novembre 2017

Devant un jury composé de :

Pr. GAYMARD Bertrand

Rapporteur

Pr. STEIN John

Rapporteur

Pr. YGGE Jan

Examinateur

Dr. PANANCEAU Marc

Examinateur

Dr. VERNET Marine

Examinateur

Pr. BREMOND-GIGNAC Dominique

Co-directrice de thèse

Dr. KAPOULA Zoï

Directrice de thèse

Remerciements

Je tenais tout d'abord à remercier le Professeur Bertrand Gaymard d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse. Je mesure le travail que cela représente et suis très honoré de pouvoir le compter parmi les membres du jury. Merci aussi au Professeur John Stein, autre rapporteur de ce travail, pour ses conseils, son soutien et la motivation qu'il m'a insufflée dans les derniers instants. De plus, leurs différents travaux respectifs ont été une source supplémentaire d'inspiration et m'ont beaucoup éclairé dans mes recherches. Je remercie aussi le Professeur Jan Ygge d'avoir accepté d'être examinateur de cette thèse. Son intérêt pour le thème de ce travail m'a honoré et je lui suis très reconnaissant d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Merci au Docteur Marc Pananceau, lui aussi examinateur de cette thèse, qui m'a soutenu dans l'entreprise de cette thèse et m'a encouragé depuis le début à aller jusqu'au bout. Merci au Docteur Marine Vernet d'avoir accepté d'être examinateur de ce travail malgré les contraintes, et dont les travaux préalables ont été sources importantes d'inspiration.

Mes remerciements vont aussi au Professeur Dominique Brémond-Gignac, ma co-directrice de thèse, qui a su suivre avec intérêt mes travaux et dont les précieux conseils m'ont permis d'exploiter mes résultats plus efficacement. Je suis très honoré d'avoir pu compter sur son aide et son soutien dans les expérimentations lancées à l'Hôpital Necker, et lui serais pour toujours reconnaissant.

Je tenais à remercier tout particulièrement Zoï Kapoula, ma directrice de thèse. Ses connaissances et sa créativité m'ont permis d'aborder mon travail sous un tout autre angle. Sa vision novatrice a été déterminante dans mes travaux et m'a ouvert à d'autres formes d'analyse, à d'autres modes de pensée. Ses recadrages et ses conseils avisés ont été essentiels à reformater ma façon de présenter mes idées. La liberté qu'elle m'a laissée pour accomplir cette thèse était inespérée et m'a permis de réaliser les objectifs fixés il y a plusieurs années, ce en parallèle de mon activité. Je n'aurais jamais réussi sans ses interventions, et elle a aujourd'hui toute ma gratitude.

Bien entendu, je tenais aussi à remercier les membres du laboratoire IRIS pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée. Chrystale Gaertner tout d'abord, qui avec une patience en or a réussi à me motiver, m'aiguiller et me conseiller de la meilleure des façons, et avec qui j'ai pu bénéficier de toute une expérience dans le domaine de l'oculomotricité. Mes travaux n'auraient certainement pas été les mêmes sans sa présence. Aurélien Morize ensuite, avec qui j'ai pu énormément échanger concernant les analyses et qui m'a permis de beaucoup mieux appréhender la vidéo-oculographie. Alexandre Lang, qui a été présent à mes débuts au laboratoire pour correctement m'encadrer dans mes analyses. Arnaud Foisy, qui m'a montré la voie et a toujours été de très bon conseil. Botao Peng, qui a été d'une grande aide dans le développement de nouvelles méthodes d'analyse. Parmi les autres membres, je citerai aussi David Cune et Florence du Chayla, qui se sont très gentiment prêtés à quelques essais de manipulation, ainsi que Lucrezia, Erwan, Claire, Capucine, Eric, Simon, Emmanuelle, qui ont aussi à eux tous apportés un vent de jeunesse et ont été une source d'énergie et de motivation supplémentaire pour moi qui en avais bien besoin.

Merci à mes anciens professeurs, formateurs et maitres de stage, qui ont su me transmettre leur connaissance et qui, sans le savoir, ont été à l'origine de ces travaux. Je citerai parmi eux Liz Wason, Steven Leslie et Bev Robberts, qui m'ont tant appris à Perth, en Australie, ainsi que Chris et Rachel Chong. Un grand merci à Françoise Olivier, qui a suivi mon évolution depuis l'obtention de mon diplôme et qui m'a toujours apporté son soutien.

Mes remerciements vont aussi à ma compagne Audrey Genelle, qui m'a supporté dans tous les sens du terme et pendant toutes ces années, et qui a contribué à la finalisation et la présentation de cette thèse. Merci aussi à mon père, Pierre, pour sa relecture attentive et ses conseils linguistiques, sur lesquels j'ai pu encore une fois compter. Merci à ma mère, Claire, pour avoir été à l'écoute dans les profonds moments de doute. Merci à l'ensemble de ma famille qui m'a suivi et encouragé jusqu'à la fin.

Merci aux collègues du lycée Fresnel, que je côtoie au quotidien et qui m'ont toujours remonté le moral et remotivé. Leur soutien a été crucial dans l'accomplissement de cette thèse. Je citerai parmi eux Antonia, Hélène, Marie, Jean-Pierre, Emmanuelle, Marie-Hélène, François, Isabelle, Jean-Christophe, Laurence, Thierry, Colette, Nacer, Florence, Gérard, Arnaud et Claire. Hélas, je dois surement en oublier.

Merci enfin à tous les étudiants qui ont accepté de participer aux différentes études présentées, ce travail n'aurait jamais été possible sans eux, et je leur en suis à tout jamais reconnaissant.

Avant-propos

A la fin de mon master en Sciences de la vision en 2007, j'ai réalisé un stage de fin de cursus en Australie chez un couple d'optométristes spécialisés dans la prise en charge des enfants et adolescents présentant des problèmes d'apprentissage. Cette première expérience m'a permis d'avoir une pratique clinique conséquente et focalisée sur ces populations particulières, et d'étudier les différentes prises en charge au niveau optométrique.

Une fois rentré en France, je me suis tourné vers la formation. Dès Novembre 2008, j'ai commencé à enseigner au sein de plusieurs écoles. J'ai par la suite été titularisé en 2013, après l'obtention de mon concours. J'avais dès lors à faire à de jeunes adultes, et j'ai été frappé par la proportion d'étudiants présentant des problèmes visuels, et plus particulièrement des désordres de l'accommodation et de la vergence. En analysant leur parcours scolaire, leurs difficultés dans certaines matières, leur symptomatologie visuelle et les problèmes d'attention qu'ils rencontraient, il m'est apparu que les troubles de la vision avaient pu avoir un impact beaucoup plus conséquent que je ne pensais. Cette problématique d'intérêt faisait interagir les domaines très vastes que sont la vision sensorielle, motrice et la cognition. Le domaine clinique de l'optométrie montrait des limites : d'une part, les études manquaient concernant ces domaines d'importance ; d'autre part, les méthodes cliniques habituelles n'apportaient pas de mesures suffisamment précises ni la possibilité d'approfondir le fonctionnement des mécanismes d'interaction entre thématiques.

Ma rencontre avec le docteur Zoï Kapoula a été déterminante, et j'ai entrepris ce travail de thèse à la fin de l'année 2012, en parallèle de mes activités de formateur et professeur. Je présente aujourd'hui mon travail qui traite de l'impact des dysfonctionnements de l'accommodation et de la vergence sur la lecture et la cognition.

Curriculum Vitae

Education

2003 : Baccalauréat Général Série Scientifique, Option SVT et Spécialité Mathématique.

2005 : BTS Opticien Lunetier (Lycée Fresnel de Paris).

2006 : Licence Professionnelle d'Optométrie à la faculté Paris XI. Obtention des DU de Contactologie et d'Optométrie.

2006 - 2008 : Master de Neurosciences, Signalisation cellulaire spécialité Sciences de la vision et Optométrie à la faculté Paris XI. Obtention des DU de Dépistage en Santé Oculaire, Sciences de la Vision et Optométrie avancée.

2013 : Obtention du CAPET Sciences Industrielles de l'Ingénieur, Education nationale, titularisation au lycée Fresnel (75)

2012 - 2017 : Doctorant au laboratoire IRIS (Paris Descartes)

Expérience Professionnelle

Recherche

2007 - 2008 : Stage de Master 2 à Perth, Australie, sous la direction de Steven Leslie (OD, College of Optometry in Vision Development) et Liz Wason (MD, COVD).

Sujet : « *L'addition dans l'évolution myopique* »

2013 - 2017 : Doctorant au laboratoire IRIS ; directeur de thèse : Z. Kapoula (DR, directeur du laboratoire IRIS, Physiopathologie de la vision et motricité binoculaire) ; co-directeur : D. Brémond Gignac (Chef de service Ophtalmologie, Hopital Necker)

Sujet : « *Dysfonctionnements de la synergie vergence et accommodation chez les jeunes adultes : impact sur les saccades, la lecture et la cognition* »

Enseignement

2008 - 2017 : Professeur en enseignement supérieur, Lycée des métiers de l'Optique Fresnel. Contractuel entre 2008 et 2013, titularisé en 2013. Enseignement en Analyse de la vision pour des 1^{ères}, 2^{èmes} années ainsi que des formations accélérées de BTS OL au Lycée Fresnel (2009 – 2017, Paris XVème) et à l'école Progress Santé (2008 – 2011, Paris Xème), enseignement au GRETA, intervention en CQP Technique (Commission Paritaire Nationale pour l'Emploi) et en Licence Professionnelle d'optométrie (Université Paris XI).

2011 : Formateur en analyse de la vision, contactologie et réfraction pour les professeurs du lycée technique Léonard de Vinci de Levallois.

Opticien - Optométriste

2004 - 2007 : Opticien. Vente, adaptation en lentille de contact (lentilles souples, rigides, kératocône), examen de vue, montage, ajustage.

Compétences scientifiques, cliniques, pédagogiques et informatiques

Formateur et professeur en optique et optométrie ; Examen clinique optométrique des fonctions visuelles, dépistage en santé oculaire, adaptation en lentille de contact, basse vision ; Vidéo-oculographie et réfractométrie objective.

Maitrise des logiciels bureautiques, de statistiques et d'internet.

Langues

Anglais (bon niveau écrit et oral), Allemand (niveau scolaire), Arabe (notions)

Publications scientifiques

1. **Daniel F**, Kapoula Z. (2016) Binocular Vision and the Stroop Test. *Optometry Vision Science*, 93(2):194-208.
2. **Daniel F**, Kapoula Z. (2017) Impact of induced vergence/accommodation conflict on reading saccades and cognition. *Journal of Vision*, Under press
3. **Daniel F**, Morize A, Bremond-Gignac D, Kapoula Z. (2016) Benefits from vergence rehabilitation: evidence for improvement of reading saccades and fixations. *Frontiers in Integrative Neurosciences*, 20;10-33.
4. Kapoula Z, Morize A, **Daniel F**, Jonqua F, Orssaud C, Brémond-Gignac D. (2016) Objective Evaluation of Vergence Disorders and a Research-Based Novel Method for Vergence Rehabilitation. *TVST*, 11;5(2):8.
5. Morize A, Brémond-Gignac D, **Daniel F**, Kapoula Z. (2017) Effects of Pure Vergence Training on Initiation and Binocular Coordination of Saccades. *IOVS* 1;58(1):329-342.

Conférences internationales

2015 : participation au 6ème congrès mondial d'optique Silmo Academy, Paris.
Présentation des résultats de l'étude « Induction d'un conflit accommodation/vergence pendant une tâche à charge cognitive variable »

2014 : participation au 5ème congrès mondial d'optique Silmo Academy, Paris.
Présentation des résultats de l'étude « Vision binoculaire et test de Stroop »

Table des matières

Remerciements	3
Avant-propos	6
Curriculum Vitae	8
Introduction	12
PARTIE 1 : CONTRIBUTIONS THEORIQUES.....	17
CHAPITRE 1 : Généralités sur la vision sensorielle	19
1.1. L'œil et la dioptrique oculaire	19
1.2. Trajet de l'information visuelle jusqu'au cortex V1	21
1.3. Les différentes régions corticales de traitement de l'information visuelle.....	22
1.4. Neurones binoculaires, fusion sensorielle et perception du relief	25
1.5. Généralités sur le système oculomoteur et l'accommodation.....	29
CHAPITRE 2 : Mouvements de vergence	37
2.1. Caractéristiques dynamiques d'un mouvement de vergence	38
2.2. Motoneurones des vergences et circuits sous-corticaux.....	40
2.3. Aires corticales impliquées dans le contrôle de mouvements de vergence.....	43
CHAPITRE 3 : Le phénomène d'accommodation, vision nette à toute distance.....	47
3.1. Biomécanisme.....	47
3.2. La réponse accommodative et la profondeur de champ	49
3.3. Les caractéristiques de la dynamique accommodative	52
3.4. L'amplitude d'accommodation maximale.....	54
3.5. Circuits sous corticaux et corticaux de l'accommodation	55
CHAPITRE 4 : Modèle optométrique et approche clinique	61
4.1. Modèle clinique des réponses de vergence et d'accommodation.....	61
4.2. Synergie accommodation/convergence	66
4.3. Dysfonctionnements A-V	70
4.4. Prévalence des dysfonctionnements A-V	77
4.6. Le cas particulier de l'insuffisance de convergence (IC)	84
4.7. Adaptation lente des réponses A-V	89
4.8. Dysfonctionnement A-V : impact sur la lecture et l'attention.....	91
4.9 Problématique : l'approche optométrique et ses limites.....	97
CHAPITRE 5 : Mouvements de saccades, fovéation de l'objet et qualité de la vision ..	101
5.1. Généralités sur les mouvements de saccade	101
5.2. Neurophysiologie des saccades	108
CHAPITRE 6 : Saccade, vergence et accommodation, une interaction constante	127
6.1. Modèles de coordination binoculaire	130
6.2. Modèles de coordination monoculaire	135
6.3. Vergence et la coordination binoculaire de la saccade.....	138
6.4. Origines possibles de la disconjugaison	140
6.5. La disconjugaison et son évolution.....	142
6.6. Troubles de la vergence : étude clinique et rééducation	144
CHAPITRE 7 : Lecture et cognition	156

7.1 Caractéristiques de la lecture	156
7.2. Cognition et attention, généralités et aires corticales impliquées	164
7.3. Le test de Stroop	177
PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES DE LA THESE	194
CHAPITRE 8 : Méthodologie générale.....	198
8.1. Population.....	198
8.2. Tests optométriques.....	198
8.3. Ethique.....	209
8.4. Critères d'inclusion	209
8.5. Stimuli et cibles	210
8.6. Enregistrement des mouvements des yeux	212
8.7. Analyses statistiques	218
ETUDE 1	220
ETUDE 2	252
ETUDE 3	295
Discussion générale	329
Conclusion et ouverture.....	340
Bibliographie.....	345
ANNEXE	382
Etude 1.....	384
Etude 2.....	401
Etude 3.....	403

Introduction

Les troubles de la vision sont généralement associés aux amétropies, comme la myopie ou l'astigmatisme. L'impact sur l'acuité et le confort visuel se ressent lorsque ces défauts ne sont pas corrigés. L'acuité visuelle reste donc aujourd'hui le paramètre majoritairement pris en compte pour caractériser la qualité de la vision au sens large. A l'heure actuelle, dans les pays industrialisés, une majorité des amétropies sont compensées par des verres correcteurs, emmetropisant les individus et réglant ainsi ces problèmes de qualité d'image.

Toutefois, de nombreuses études épidémiologiques montrent que d'autres désordres de la vision, plus discrets et demandant plus de mesures cliniques pour être dépistés, ne sont pas d'origine réfractive, et concernent la fonction d'accommodation de l'œil et la vision binoculaire (Cacho-Martinez et al., 2010 ; Montés-Micó, 2001 ; Cooper et Jamal, 2012). Ces troubles, malgré la correction de l'amétropie, sont responsables d'une symptomatologie visuelle caractéristique. Souvent transitoire et ressentie particulièrement à certaines distances de vision ou dans certaines conditions ergonomiques, elle reste potentiellement handicapante (Ciuffreda, 2002 ; Scheiman et Wick, 2014 ; Rouse et al., 2009, Maples, 2002).

Ces dysfonctionnements, considérés comme mineurs, car ne présentant pas les mêmes caractéristiques qu'un strabisme ou qu'une paralysie, peuvent dans leur majorité être pris en charge par une correction adaptée et/ou par une rééducation orthoptique. En effet, la qualité de la vision sensorielle dépend aussi du système accommodatif d'une part, qui permettra une perception nette des objets fixés à toutes les distances, ainsi que du système de vergence d'autre part, impliqué directement dans la perception simple des objets fixés à toute profondeur. D'un point de vue fonctionnel, ces deux systèmes agissent en synergie, en particulier en vision proche, où l'angle de vergence et l'ajustement de l'accommodation doivent de rester stables tout au long de la tâche visuelle pour assurer la meilleure qualité de vision dans le temps.

Dans le domaine clinique d'optométrie, plusieurs études épidémiologiques mettent en relation ces dysfonctionnements avec les difficultés scolaires, en particulier chez les plus jeunes (Vaughn et al., 2006 ; Borsting et al., 2003 ; Shin et al., 2009). Statistiquement, on retrouve

des performances scolaires diminuées chez les enfants présentant ces troubles. Du côté clinique, la symptomatologie est montrée comme principale responsable de cette situation. Toutefois, les difficultés rencontrées par ces populations se retrouvent aussi dans différents autres domaines comme celui de la lecture, de moins bonne qualité (Grisham et al., 2007 ; Cohen et al., 2010 ; Garzia, 1993), et celui du déploiement attentionnel, moins efficient lui aussi (Borsting et al., 2005 ; Granet et al., 2005). Ces études évoquent la responsabilité de la diminution de la qualité de la vision et des symptômes visuels vis-à-vis mauvaises performances scolaires, des problèmes d'apprentissage ou de lecture, ou encore des problèmes d'attention, sans cependant approfondir les mécanismes d'interactions entre ces domaines.

Il n'est cependant que très rarement question de motricité binoculaire, pourtant essentielle dans la vie quotidienne, et plus particulièrement pendant la tâche de lecture. D'un point de vue oculomoteur, l'interaction entre saccade et vergence ainsi que les saccades en lecture ont fait l'objet de nombreuses recherches. Toutefois, assez peu se sont focalisées sur les sujets présentant des fragilités au sein des mécanismes de vergence et/ou d'accommodation. Cette activité, importante dans l'apprentissage, sollicite en parallèle les processus visuomoteurs et la cognition (Rayner, 1998 ; Clifton et al., 2016 ; Dehaene et Cohen, 2011). Une bonne synergie entre vitesse de lecture, mémorisation des informations, accès au sens du texte et maintien de l'attention sont dès lors indispensables pour l'efficacité de cette tâche. Dans cette thèse, notre volonté première est d'approfondir les mécanismes d'interaction entre dysfonctionnements A-V, motricité binoculaire et qualité de la lecture. En introduisant l'apport de la vidéo-oculographie aux mesures cliniques habituelles, nous pourrions étudier leurs interférences sous un angle différent et avec plus de précision.

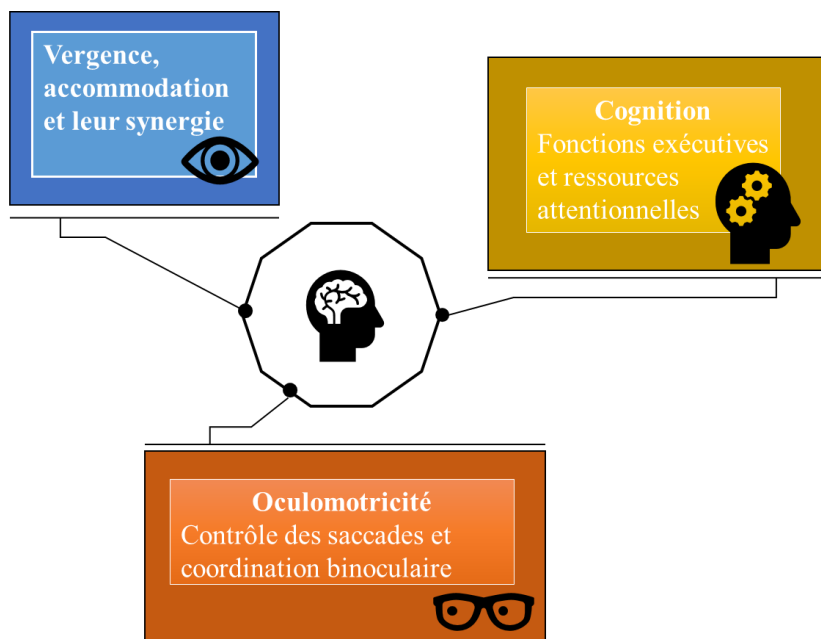
Enfin, le phénomène endogène du maintien de l'attention pendant une tâche particulière, en lien avec l'attention visuelle, fait intervenir des aires cérébrales caractéristiques (réseau cingulo-fronto-pariétal, Wang et al., 2010 ; Bush et al., 2011). Ces régions sont similaires en de nombreux points à impliquées dans la réponse de vergence et d'accommodation (Leigh et Zee, 2016 ; Gamlin, 2002). Ici encore, les interactions entre ces deux domaines n'ont été que très peu étudiées et sont en lien direct avec la problématique de cette thèse. Un autre de nos objectifs est d'approfondir les liens potentiellement existants entre les processus visuels permettant de récupérer une image simple, nette et de façon durable, et les processus cognitifs de haut niveau.

Dans une première partie théorique, nous nous attacherons à présenter les mouvements de vergence, les variations d'accommodation et leur synergie. Les trois premiers chapitres leur seront ainsi consacrés. La neurophysiologie et les circuits corticaux impliqués dans ces deux réponses seront abordés en détails. Ainsi, nous pourrions introduire les premiers thèmes importants de cette thèse que sont l'approche clinique de la synergie Accommodation-Vergence (A-V) et les dysfonctionnements qui lui sont associés dans le 4^{ème} chapitre. Nous reviendrons sur la prévalence de chacun des troubles, ainsi que sur les moyens actuels pour dépister et rééduquer ces désordres dans la pratique clinique. Les chapitres 5 et 6 vont nous permettre de présenter deux autres thèmes d'importance dans cette thèse : les mouvements de saccade et l'interaction saccade-vergence-accommodation. Nous aborderons les dysfonctionnements A-V sous un autre angle, insistant sur les limites de la pratique clinique concernant la motricité binoculaire, plus particulièrement la coordination binoculaire des saccades. Le chapitre 7 présentera ensuite la tâche de lecture et ses aspects oculomoteur et cognitif, ce qui nous permettra d'étudier un premier domaine où vision, oculomotricité et cognition doivent fonctionner de concert. Cette tâche demande à la fois une bonne coordination visuomotrice et l'intervention de la cognition, dans le déchiffrage, l'analyse du sens, la mémorisation, la compréhension du texte et le contrôle de l'attention. Nous terminerons la partie théorique par une revue des mécanismes cognitifs dans le chapitre 8. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur le déploiement attentionnel, le fonctionnement de l'attention visuelle ainsi que sur les fonctions exécutives cognitives, pour introduire le test neuropsychologique de Stroop dont nous allons nous servir dans nos expérimentations. Il permet en effet d'évaluer les capacités de lecture et d'inhibition des sujets, fonction exécutive impliquée dans le processus d'attention. Cette approche est innovante car la recherche sur la vision binoculaire sensorielle ou motrice se limite jusqu'à présent se limite jusqu'à présent à des stimuli visuels sans contenance cognitive.

Dans la partie expérimentale, nous détaillerons les contributions des 3 études que nous avons réalisées. Le chapitre 9 présentera la population étudiée, ici de jeunes adultes, et la méthodologie expérimentale concernant les tests cliniques, de lecture et neuropsychologiques pratiqués. Le chapitre 10 concernera notre première étude qui croise les résultats des tests cliniques optométriques avec les résultats d'un test de lecture et du test de Stroop. Le chapitre 11 sera consacré à notre deuxième étude dans laquelle nous utilisons la vidéo-oculographie et qui se focalise sur l'impact de l'induction d'un conflit A-V pendant la passation du test de Stroop. Le chapitre 12 portera sur notre 3^{ème} étude, dans laquelle nous avons enregistré les

mouvements des yeux pendant un test de lecture chez de jeunes adultes présentant un désordre de la vergence, et ce avant et après la réhabilitation de leur vergence à l'aide de l'appareil REMOBI. Le schéma ci-après résume la pensée et l'apport de cette thèse.

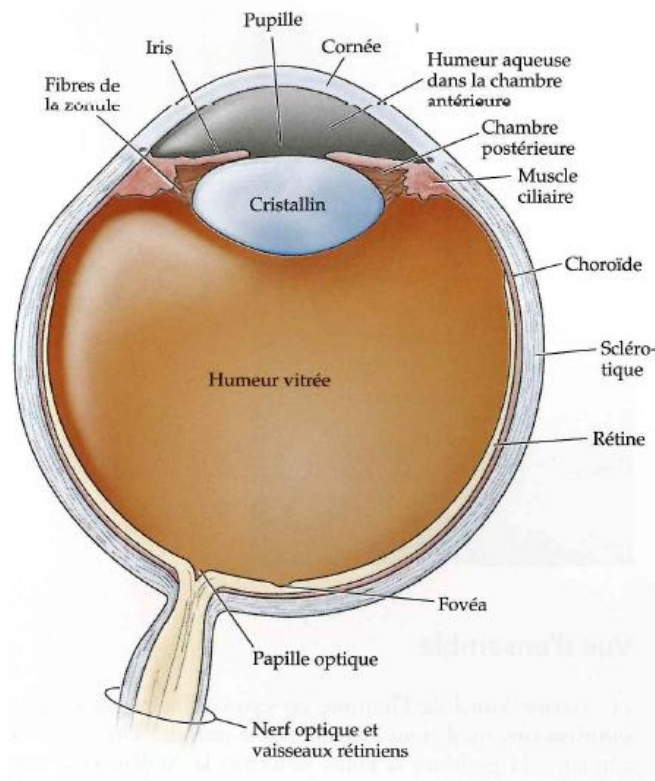
Enfin dans une dernière partie, nous présenterons une synthèse générale, des conclusions et des perspectives suivies en annexe par les articles publiés ou en cours.



PARTIE 1 : CONTRIBUTIONS THEORIQUES

CHAPITRE 1 : Généralités sur la vision sensorielle

1.1. L'œil et la dioptrique oculaire



Les différentes structures de l'œil, en particulier ses milieux transparents comme la cornée et le cristallin, qui permettront la formation des images provenant des objets nous entourant sur la rétine, d'après Purves et al., 2015

L'œil est un organe composé de différentes structures qu'il est essentiel de présenter dans le cadre de notre travail. La lumière provenant des objets de l'extérieur va en effet traverser les milieux transparents de l'œil, qu'on peut considérer comme un système optique composé d'une cornée et d'un cristallin, et va devoir se focaliser sur la rétine pour permettre à l'objet d'être perçu net par l'individu. Les travaux d'Yves Le Grand et Hermann Von Helmholtz nous sont utiles pour comprendre cette première étape essentielle au fonctionnement de la vision : la focalisation de la lumière sur la rétine.

Les milieux transparents qui composent l'œil sont très spécifiques et différents entre eux de par leurs indices de réfraction. D'un point de vue purement dioptrique, l'œil est composé d'une cornée d'environ 40δ et d'un cristallin d'environ 20δ lorsqu'il est au repos. Leur association fait culminer la vergence de l'outil visuel autour de 60δ . La lumière pénétrant à l'intérieur et passant par la pupille va donc être réfractée et converger en direction de l'écran

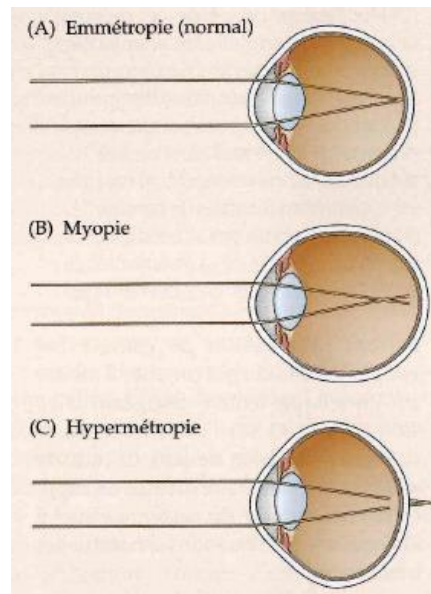
réтинien final. À un objet du champ visuel extérieur va correspondre une image à l'intérieur de l'œil, et celle-ci devra être focalisée sur l'écran réтинien pour que sa définition soit optimale et que l'individu perçoive l'objet d'intérêt de façon nette. Ce qui fait la spécificité de l'œil en tant que système optique est ici la capacité de son cristallin à modifier sa courbure. En effet, la structure qu'est le cristallin, rattachée aux muscles ciliaires de Brücke et de Rouget-Müller par les zonules de Zinn, va pouvoir modifier sa capacité dioptrique afin d'augmenter ou diminuer la puissance dioptrique totale de l'œil, et ainsi permettre d'ajuster la focalisation d'une image sur la rétine.

De ce fait, la puissance de l'œil est très fréquemment exprimée « au repos accommodatif » et il nous est possible de mesurer les fluctuations de l'accommodation en étudiant directement les fluctuations de la vergence dioptrique de l'œil dans différentes conditions. Cette définition « optique » de l'œil est donc forcément représentative, car elle nous permet de comprendre ce qu'est une amétropie, un défaut visuel lié directement à la non concordance entre le lieu de focalisation de la lumière et la position de la rétine (ou longueur de l'œil). Dans le cadre de notre travail, nous avons étudié une population de jeunes adultes étudiants qui étaient déjà corrigés pour leurs amétropies. Cependant, il est nécessaire pour nous de montrer succinctement le fonctionnement et les effets d'une amétropie sur la vision.

Pour qu'un œil soit considéré comme n'ayant aucun défaut visuel, ou emmetrope, il faut par conséquent que lorsqu'il fixe une cible lointaine, la puissance de son œil « au repos accommodatif » soit parfaitement adaptée pour focaliser l'image de cette cible sur sa rétine. Si ça n'est pas le cas, il y a un problème de calibrage entre la longueur de l'œil (profondeur réтинienne) et sa vergence, le plan focal image de l'œil n'est alors pas en concordance avec le plan de la rétine. On parlera par exemple d'un œil trop puissant pour sa longueur, ou trop long pour sa puissance, dans le cas d'un œil myope, car des rayons lumineux provenant d'une cible à l'infini convergeront en avant de la rétine, et d'un œil trop court pour sa puissance dans le cas d'un œil hypermétrope, car cette fois les rayons lumineux provenant d'une même cible convergeront en arrière de la rétine.

Une amétropie sphérique vient donc, optiquement parlant, d'une non concordance entre la puissance totale de l'œil au repos et de sa longueur. L'astigmatisme sera, lui, un défaut de sphéricité très fréquemment lié à la forme de la cornée et qui impactera l'acuité à toutes distances sans distinction. Cependant, comme il s'agit de désordres optiques, il est plutôt aisé

d'y remédier en réalisant une réfraction et en trouvant le verre correcteur correspondant directement au défaut. Dans le cadre de notre travail, les sujets étudiés ne présentaient pas de baisse d'acuité visuelle liée à une amétropie non corrigée.



Focalisation de l'image d'un objet à l'infini en fonction des amétropies sphériques. D'après Purves et al., 2015

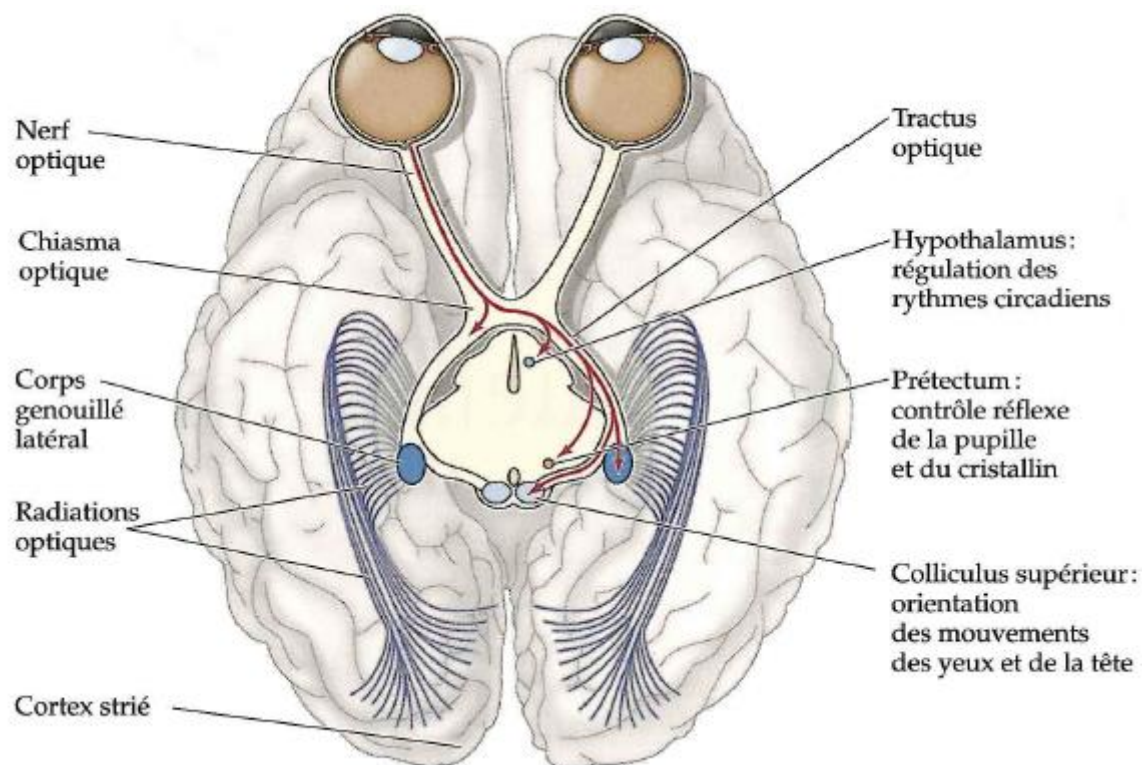
Malgré tout, la précision de la réfraction optique reste très importante. En effet, comme nous pouvons le constater encore aujourd'hui, certaines amétropies peuvent passer inaperçues, surtout quand elles sont faibles et du côté hypermétrope. Si l'image finale d'un individu se focalise derrière la rétine, le système visuel peut alors déclencher le phénomène d'accommodation pour la re-focaliser. L'œil n'est alors plus au « repos accommodatif », et l'individu doit donc faire un effort musculaire constant pour voir net dans sa vie de tous les jours, ce qui peut ensuite entraîner des difficultés, surtout en vision de près, car l'effort accommodatif engendré peut s'avérer difficile à maintenir dans certains cas. Ce point sera abordé plus en détail au moment de la présentation de l'accommodation.

1.2. Trajet de l'information visuelle jusqu'au cortex V1

Une fois focalisée sur la rétine, la lumière va interagir avec les photorécepteurs qui composent sa partie neurale. Une cascade de réactions chimiques va avoir lieu, et la photo-transduction va permettre la conversion du signal lumineux en message nerveux. Le cheminement de ce dernier passera des photorécepteurs au cortex visuel V1 via les neurones bipolaires, puis les cellules ganglionnaires constituant le nerf optique.

L'information visuelle va ensuite être distribuée vers différentes structures anatomiques. On distinguera les différentes voies suivantes :

- ✓ La voie rétino-géniculostriée, ou voie visuelle primaire : Corps genouillés latéraux (CGL) puis cortex strié.
- ✓ La voie rétino-hypothalamique (projetant vers l'hypothalamus), la voie photique (projetant vers le prétectum puis le noyau d'Edinger-Westphal) et la voie rétino-tectale (projetant vers le colliculus supérieur puis le prétectum), qui constituent les voies secondaires.



Voies visuelles et projections centrales des cellules ganglionnaires de la rétine. D'après Purves et al., 2015

1.3. Les différentes régions corticales de traitement de l'information visuelle

Si les informations visuelles ont tendance à employer des structures similaires au départ (Cellules ganglionnaires, CGL, cortex V1), elles vont diverger de façon plus appuyée par la suite et une dichotomie va apparaître. Dépendant de leur nature, ces informations visuelles ayant ainsi cheminé jusqu'au cortex strié vont poursuivre leur parcours vers d'autres structures corticales spécialisées. En relation directe avec le premier tri de l'information, relatives aux détails et aux couleurs pour la voie « parvocellulaire » et relatives à la position

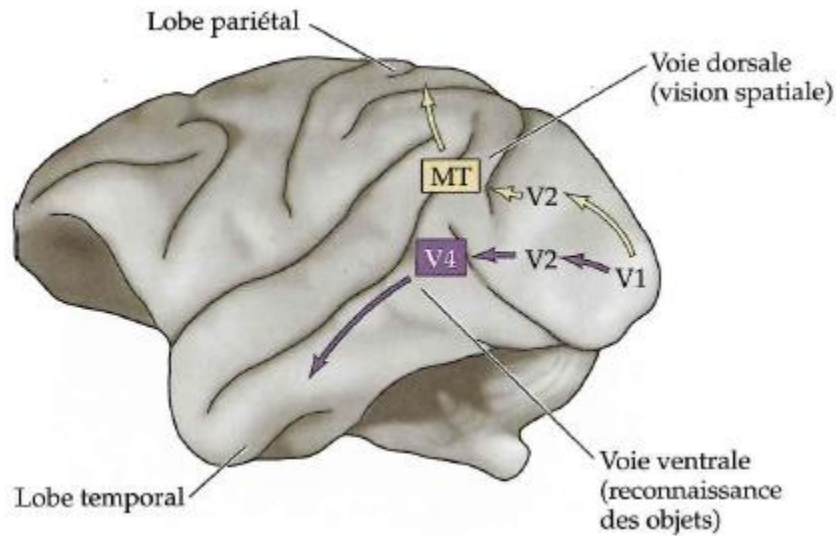
dans l'espace et aux mouvements des objets pour la voie « magnocellulaire », les structures impliquées dans l'identification des formes et des couleurs seront situées au sein du cortex temporal (voie du « quoi ? ») pendant que celles impliquées dans la localisation et la détection des mouvements seront situées au sein du cortex pariétal (voie du « où ? ») (Ungerleider et Mishkin, 1982 ; Livingstone et Hubel, 1988 ; Haxby et al., 1991). Plus l'information va progresser le long des voies de traitement, plus l'analyse va se complexifier et se spécialiser.

Voie ventrale et identification

L'information visuelle nécessaire à l'identification des objets (détails, couleurs...) transite d'abord par le biais des cellules ganglionnaires de type « parvocellulaire » au niveau de la rétine puis par certaines couches des CGL, atteint les cellules IV C β et IV C de l'aire V1 ainsi que les couches II et III de V1, les bandes minces et les bandes pâles de V2, l'aire V3v, l'aire V4, pour finir sa course au niveau du cortex temporal inférieur (Purves et al., 2015). Plusieurs auteurs ont montré que l'ablation de ce dernier entraînait des difficultés dans la discrimination et la reconnaissance des formes. Les neurones situés dans les différentes structures citées permettent en effet d'aboutir à une représentation cohérente des objets perçus au niveau du cortex inféro-temporal. Celui-ci peut d'ailleurs être segmenté en plusieurs régions préférentielles distinctes, répondant à une forme de reconnaissance bien particulière : chiffres, lettres, visages, objets (Puce et al., 1996 ; Ishai et al., 2000 ; Dehaene, 2007).

Voie dorsale, localisation et perception du mouvement

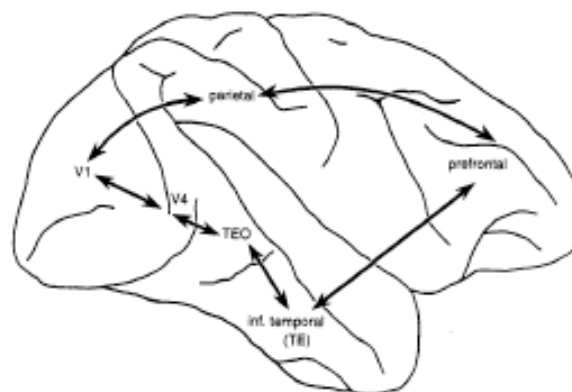
L'information visuelle nécessaire à la détection du mouvement transite elle par le biais des cellules ganglionnaires de type « magnocellulaire » au niveau de la rétine, par certaines couches des CGL ensuite, atteint les cellules de la couche IV C α et de la couche IVC de l'aire V1 puis de la couche 4B de V1, les aires V2, V3d et V3A, l'aire MT/V5, et finit sa course au sein du cortex pariétal (Purves et al., 2015). La majorité des neurones situés dans les différentes aires citées précédemment présente une importante sensibilité à la direction des mouvements, et ne répond par contre que très peu au stimulus de forme et de couleur. La voie dorsale est donc plus spécialisée dans l'analyse des mouvements des objets à l'intérieur du champ visuel ainsi que dans la localisation des différents objets dans la scène visuelle.



Représentation des voies ventrale et dorsale impliquées dans le traitement de l'information visuelle chez le primate. D'après Purves et al., 2015

Projections vers le cortex préfrontal

Dans le cadre de notre travail, il est important d'aborder les connexions entre les voies responsables de l'analyse de l'information visuelle et les structures corticales responsables du fonctionnement cognitif. En nous appuyant sur les travaux réalisés par Desimone et Duncan (1995), Wilson et al. (1993) et Rao et al. (1997) sur des primates ou sur des humains, on notera que les connexions avec le cortex préfrontal, impliqué par exemple dans les fonctions exécutives cognitives, se font de manière dichotomique sur différentes portions de ce cortex particulier.



Projection neuronale des voies ventrale et dorsale en direction du cortex préfrontal, d'après Desimone et Duncan, 1995.

Impliquées directement dans la transmission des informations d'identification des objets (voie occipito-temporale) et de visualisation spatiale (voie occipito-pariétale), elles vont intervenir

dans les processus cognitifs complexes, en permettant par exemple au sujet de focaliser son attention sur un stimulus visuel particulier (Desimone et Duncan, 1995 ; Constantinidis, 2006 ; Saupe et al., 2009 ; Freedman et al., 2001) ou de mémoriser une information visuelle (Fuster et al., 1985 ; Constantinidis et Procyk, 2004 ; Rawley et Constantinidis, 2009). Les échanges neuronaux avec les zones corticales impliquées dans la cognition se font donc majoritairement par ces deux pôles, empruntant des voies distinctes.

1.4. Neurones binoculaires, fusion sensorielle et perception du relief

Dans le cadre de notre travail, nous allons évoquer la vision binoculaire et la perception simple de l'environnement à partir des images des deux yeux réunis. Dans la pratique clinique commune, on parle de différents degrés pour son acquisition, allant de la biocularité, signifiant que le cortex reçoit bien les images des deux yeux simultanément et qu'il n'y a donc pas de suppression corticale, à la perception binoculaire du relief, provenant de l'analyse des disparités rétinienne de très faible amplitude, en passant par la fusion sensorielle.

La perception simple de l'environnement à partir de l'image des deux yeux ainsi que la perception binoculaire des reliefs à l'intérieur de la scène visuelle sont rendues possibles d'un point de vue cortical grâce à l'existence de neurones binoculaires au sein de différentes structures par lesquelles transitent les informations visuelles (Hubel et Wiesel, 1962 ; Poggio et al., 1985). L'allusion de l'œil cyclope pour caractériser la perception unique est en effet très adaptée. Pour décrire la fusion des images, on peut donc réduire les deux yeux à un seul œil fictif, situé en plein milieu de ceux-ci, et permettant non seulement d'avoir une perception simple de l'espace, mais aussi de réagir comme s'il voyait le monde au travers d'un seul point.

La notion d'images rétinienne correspondantes est importante à développer, car c'est elle qui est à l'origine de la construction de la vision binoculaire et par conséquent, de la perception des reliefs qui est son degré le plus poussé. Cette construction se réalise à partir de l'expérience visuelle, elle démarre en général entre 8 et 18 mois pour se prolonger jusqu'à environ 3 ans (Birch et Salomao, 1998 ; Sherry et al., 2005). Si durant cette période sensible, une rivalité entre les deux yeux vient perturber le sujet dans sa fixation binoculaire (strabisme...) ou dans la qualité de ses images rétinienne (anisométrie et amblyopie, déprivation...), la stimulation des neurones binoculaires ne se fera pas correctement et cela

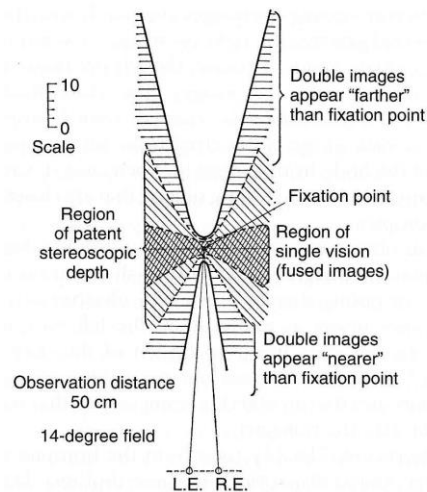
entraînera un déficit parfois important de la perception du relief binoculaire chez l'individu (Hubel et Wiesel, 1970 ; Von Noorden et al., 1971 ; Wilson et al., 1993).

Le premier processus de fusion centrale peut se produire, par la stimulation simultanée de ces deux points rétiniens avec les images d'un même objet, donc similaires en taille et forme. La fusion périphérique se fera elle aussi de la même façon, les correspondances rétiniennes étant dès lors rendues possibles à partir du moment où :

- Les images d'un même objet doivent appartenir à des parties rétiniennes correspondantes (Rétine temporale OD \leftrightarrow Rétine nasale OG et vice versa ; rétines supérieures OD et OG ou inférieures OD et OG).
- Les images doivent être approximativement à égale distance des centres de références que sont les fovéas.

Les deux rétines ne se correspondent cependant pas véritablement par intermédiaire de point, mais plutôt par intermédiaire de zones, qu'on appelle « aires de Panum ». Ce sont des aires de fusion corticales, des zones dans lesquelles chaque point, lorsqu'il sera stimulé avec un point correspondant de l'autre rétine, apportera une perception simple de l'objet. Ces aires de fusion corticales permettent ainsi d'échapper à une correspondance stricte entre les deux rétines et apportent une flexibilité supplémentaire au phénomène de fusion corticale.

Ces zones de fusion corticales peuvent être représentées comme des portions infimes de champ visuel correspondant à la position précise d'une image sur un des deux yeux. Elles sont en général quantifiées en valeur angulaire, car elles représentent la flexibilité qu'a le système de fusionner les images d'un objet qui n'est pas vu sous le même angle que le point de fixation dans la scène visuelle. Plus larges en périphérie (pouvant absorber jusqu'à 2° de disparité) qu'en vision centrale (mesurée jusqu'à 2' d'arc ; Howard et Rodgers, 1995), il est possible de les représenter de forme elliptique à grand axe horizontal. Un sujet sera donc beaucoup plus sensible à la vision double dans le cas de disparités binoculaires verticales et présentées dans son champ visuel central. De la même façon, l'existence de cette flexibilité permet de fusionner les images d'un objet alors que les axes visuels ne se croisent pas strictement dessus, mais légèrement en avant ou en arrière.



Pour un point de fixation donné à 50cm dans le plan médian, il existe autour du point fixé toute une région de « vision simple » où un autre point situé sera perçu simple en même temps que le point fixé (horoptère expérimental). La taille de cette zone augmente progressivement avec l'excentricité. Au-delà de cette zone, si on éloigne de trop ou on rapproche de trop le deuxième objet, la disparité binoculaire (différence d'angle de perception entre les deux images) devient trop importante et l'objet sera perçu double (diplopie croisée si l'objet est plus proche que le point de fixation, homonyme s'il est plus éloigné dans la profondeur). L.E. : œil gauche, R.E. : œil droit. D'après Ogle KN, 1962.

Tout point situé à l'intérieur de l'horoptère sera donc perçu simple en même temps que le point de fixation, et la profondeur entre les objets sera tout de même perceptible par le sujet : c'est dans cette zone que la perception du relief binoculaire pourra se produire. Elle va découler de l'analyse de la très fine disparité binoculaire horizontale entre les images. Le seuil de perception stéréoscopique dépend ici encore directement de l'excentricité des cibles entre elles, mais a cependant pu être évalué à l'aide de tests de perception de relief direct ou de test partiellement dissociant. Les valeurs retrouvées font état d'un seuil pouvant parfois avoisiner les 2 secondes d'arc (Howard, 1919), ce qui représente une disparité plus faible que celle de la taille d'un cône de la fovéa. Ainsi, l'acuité stéréoscopique, en comparaison à l'acuité visuelle qui elle est une mesure de la discrimination des détails d'un objet, est souvent qualifiée d'hyperacuité tant sa précision relève de l'analyse de détails extrêmement fins.

L'acuité visuelle est une mesure qui renseigne monoculairement sur de nombreux points très divers : évaluation d'un éventuel degré d'amétropie, ou de la qualité des structures transparentes de l'œil, de la rétine et des voies visuelles par exemple. Une acuité visuelle supérieure ou égale au standard de $10/10^{\text{ème}}$ est signe que l'image de l'échelle d'acuité fixée se focalise sur la rétine, que la lumière émise est transmise correctement par les structures

transparentes de l'œil, que la fovéa ne présente pas de désordre anatomique ou pathologique et que le message nerveux est correctement reçu et analysé par les aires visuelles impliquées.

L'acuité stéréoscopique va, elle, représenter un outil très utile pour évaluer la qualité de la vision binoculaire, la perception du relief étant le degré le plus poussé. Une bonne acuité stéréoscopique centrale est signe : que le sujet ne présente pas de problèmes majeurs dans le fonctionnement de sa vision, car la qualité de sa discrimination du détail est bonne sur les deux yeux (en lien direct avec les acuités visuelles monoculaires) ; que la fusion motrice se fait ici correctement car les images des deux yeux sont fusionnées donc tombent sur des points correspondants, ce qui implique que les axes visuels se croisent sur l'objet d'intérêt sans disparité importante ; que le processus de fusion sensorielle est bien établi et que les neurones binoculaires sont correctement stimulés pour apporter une perception unique de la scène visuelle et, par la même occasion, la détection fine des reliefs.

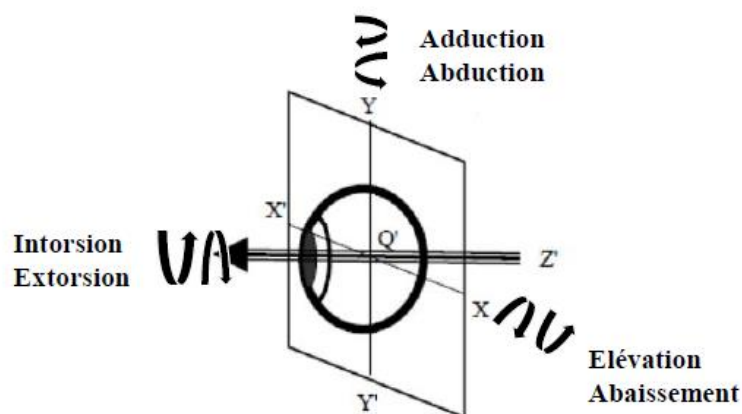
Si la correspondance rétinienne des images se construit par l'expérience jusque l'âge d'environ 18 mois (Sherry et al., 2005) et que la perception du relief découle ensuite de cette organisation particulière, c'est avant tout grâce au système oculomoteur. Qu'il s'agisse des muscles extra ou intra-oculaires, la construction d'une vision binoculaire normale est basée sur le fait que le sujet alignera ses axes visuels sur les objets fixés et qu'il en obtiendra par la même occasion une perception nette pour une qualité de détails optimale. Cela repose donc sur un système visuomoteur de bonne qualité, capable de fixer avec le moins de disparité possible à toutes distances et de réaliser des mouvements coordonnés pour les deux yeux, et sur un système accommodatif capable de faire la focalisation sur l'image à toutes profondeurs, en quelque sorte une image simple et nette dans les conditions naturelles. C'est sur le système visuomoteur que reposera la qualité du signal visuel final, ce qui nous conduit à sa présentation par la suite.

1.5. Généralités sur le système oculomoteur et l'accommodation

Les fonctions de vergence et d'accommodation sont les plus évaluées dans la pratique clinique, étant directement impliquées dans la perception simple et nette de l'environnement dans la profondeur. Partant de ce constat, nous avons souhaité nous focaliser plus particulièrement sur ces deux processus visuomoteurs en présentant le modèle fonctionnel clinique qui leur est associé, afin d'aborder les diagnostics des problèmes rencontrés dans la pratique. Dans le cadre de notre travail, l'un de nos objectifs était de nous focaliser sur les dysfonctionnements et leur potentiel impact néfaste sur la motricité binoculaire et sur la cognition. Nous commencerons donc par présenter les généralités concernant les mouvements de vergence, puis nous focaliserons sur le mécanisme d'accommodation, pour finir par détailler le modèle fonctionnel clinique optométrique qui leur est associé.

1.5.1. L'œil en mouvement : généralités sur l'aspect moteur de la vision binoculaire

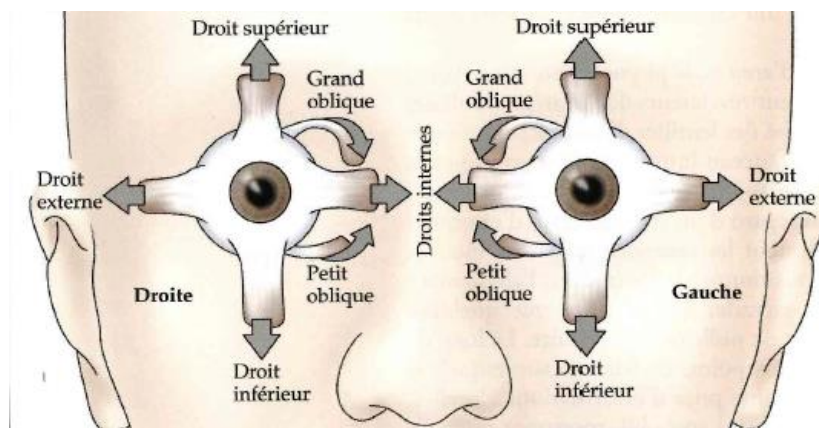
Chaque globe oculaire présente une capacité de rotation selon différents axes rendue possible par l'existence de 3 paires de muscles extra-oculaires. Ainsi, chaque œil a la possibilité d'explorer son champ de regard par des mouvements horizontaux (droite/gauche), verticaux (haut/bas) ou de torsion selon un axe antéro-postérieur (intorsion, vers le nez/extorsion, vers la tempe), très souvent combinés.



Axes de rotation du globe oculaire. Q' : centre de rotation vrai, XX' : élévation et abaissement, YY' : adduction et abduction, ZZ' : intorsion et extorsion

Six muscles extra-oculaires sont responsables de la motilité de chaque œil : les muscles droits latéraux (ou externes) et médians (ou internes) interviennent majoritairement dans les

mouvements horizontaux (adduction et abduction), les muscles droits supérieurs, inférieurs, et obliques supérieurs (ou grand oblique) et inférieurs (ou petit oblique) ont une action composée liée à la structure anatomique des orbites, aux insertions musculaires au niveau des globes et à la position du globe oculaire. Si l'œil est en abduction, le muscle droit inférieur interviendra dans les mouvements d'abaissement et le muscle droit supérieur interviendra dans les mouvements d'élévation alors que le muscle oblique supérieur sera responsable des mouvements d'intorsion et le muscle oblique inférieur des mouvements d'extorsion. Si l'œil est en adduction, les muscles droits inférieur et supérieur seront cette fois respectivement responsables des mouvements d'extorsion et d'intorsion, pendant que les muscles obliques supérieurs et inférieurs seront impliqués dans les mouvements d'abaissement et d'élévation. Ces directions particulières montrent par la même occasion les actions antagonistes de chaque muscle d'une même paire.



Position et contribution au mouvement de chaque muscle extra-oculaire. D'après Purves et al., 2015.

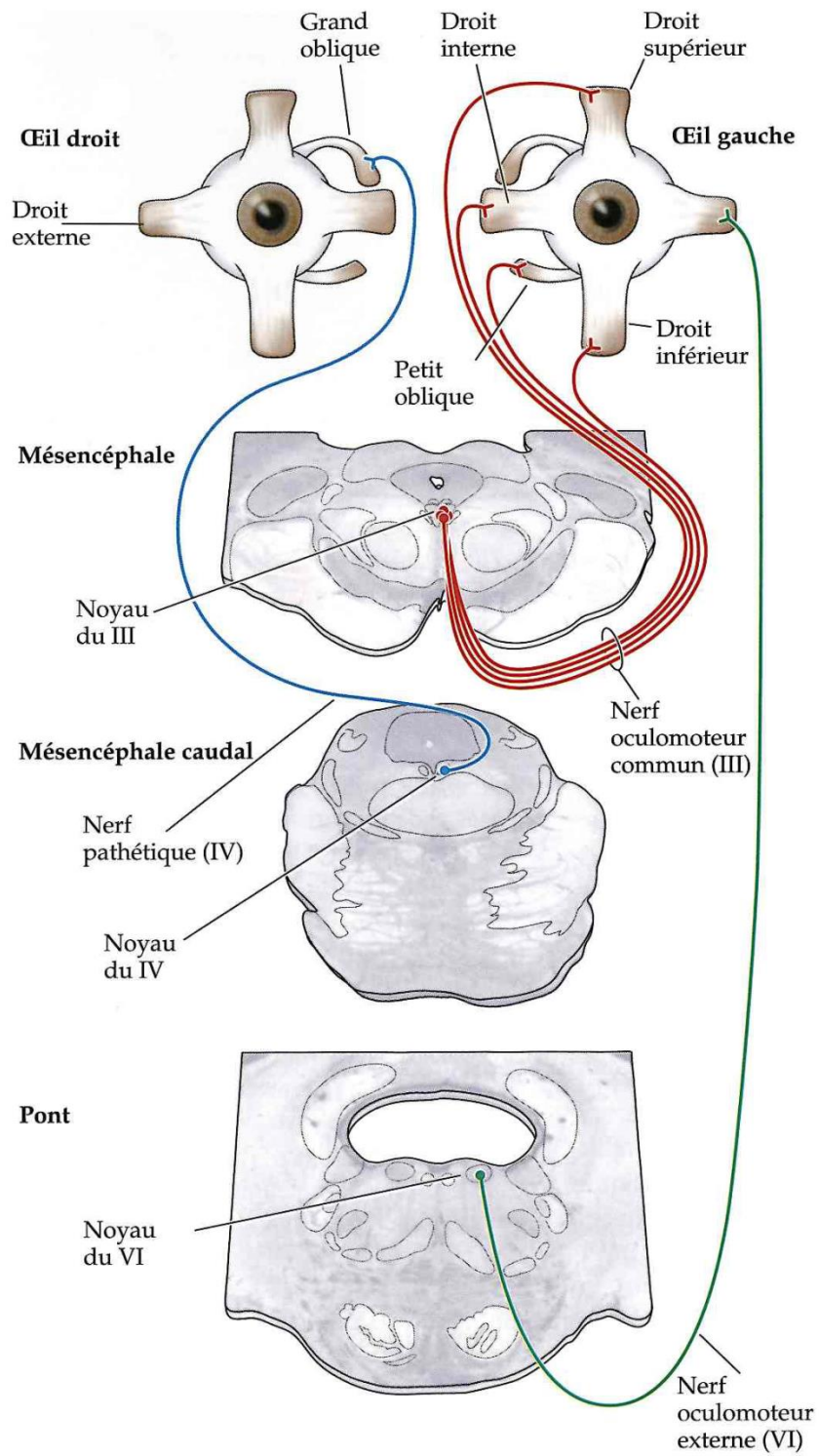
L'activité des muscles extra-oculaires est régie par deux lois fondamentales :

- ✓ La loi d'innervation réciproque, dite « loi de Sherrington », qui veut que la contraction d'un muscle entraîne la relaxation équivalente du muscle qui lui est antagoniste (ex : le droit supérieur et le droit inférieur, le droit médian et le droit latéral, à chaque fois du même œil).
- ✓ La loi de correspondance motrice, ou « loi de Hering », qui intervient dans les mouvements binoculaires et implique que l'influx nerveux envoyé à un muscle pour un œil est envoyé à son agoniste simultanément et à intensité égale.

Sans plus entrer dans le détail à propos de la description de ces muscles, nous reviendrons plus longuement sur le respect de cette dernière loi encore sujette à débat aujourd'hui, en particulier concernant les interactions entre différents mouvements oculaires spécifiques.

Les muscles extra-oculaires sont innervés par des motoneurons qui permettront de faire circuler le message nerveux responsable des commandes motrices. On les retrouve dans 3 paires de nerfs crâniens différentes, qui prennent leur origine dans leur noyau respectif au sein du tronc cérébral :

- ✓ Le nerf crânien III, ou nerf oculomoteur commun, qui prend naissance au niveau du noyau oculomoteur (partie mésencéphalique haute) et va innerver les muscles droits interne, supérieur, inférieur et petit oblique ipsilatéraux.
- ✓ Le nerf crânien VI, abducens ou oculomoteur externe, qui prend naissance dans le noyau abducens (jonction bulbo-protubérantielle) et innerve le muscle droit externe ipsilatéral ainsi que le noyau oculomoteur controlatéral (III), par l'intermédiaire d'interneurones via le faisceau longitudinal médian.
- ✓ Le nerf crânien IV, nerf trochléaire ou pathétique, qui prend naissance dans le noyau trochléaire (partie mésencéphalique basse) et innerve le muscle grand oblique controlatéral.



Trajet de l'information nerveuse motrice vers les muscles extra oculaires. D'après Purves et al., 2015

1.5.2. Les différents mouvements stéréotypés

Les différentes approches cliniques ne prennent pas assez en compte la constante mobilité de l'œil dans l'espace 3D. Ces mouvements, bien que contrôlés par diverses structures corticales et anatomiques, restent stéréotypés. Si l'œil est l'organe responsable de la vision, sa mobilité va être primordiale pour deux caractéristiques essentielles : stabiliser le regard d'une part et le déplacer d'autre part. Directement au service de l'efficacité visuelle, les mouvements des yeux vont permettre, en toutes circonstances ou presque, de maintenir une perception simple de l'environnement et de l'objet d'attention, quel que soit le déplacement de l'individu ou de sa cible. Dans le cadre de notre travail, nous nous focaliserons surtout sur certains types de mouvements relatifs à l'orientation du regard plus qu'aux réflexes de stabilisation. Nous nous appuyerons sur les travaux de Leigh et Zee (2016), Purves et al. (2015), Vernet (2009) et Gaertner (2014) pour le descriptif suivant.

Les réflexes de stabilisation

Il existe deux réflexes de stabilisation différents visant à maintenir la fovéa sur l'objet de fixation lorsque le corps est en mouvement par rapport à la cible (mouvement de la tête, mouvement du corps entier ou mouvement de l'environnement) :

- ✓ Le réflexe vestibulo-oculaire (VOR) va intervenir lors de mouvement de rotation de la tête par exemple, et est le fruit d'interactions entre le système oculaire et le système vestibulaire. L'accélération provoquée par des mouvements de rotation de la tête va entraîner des mouvements de rotation compensatoire des yeux dans le sens opposé afin de maintenir l'objet fixé sur la fovéa du sujet.
- ✓ Le réflexe optocinétique (OKN) est déclenché lui lorsque l'environnement se déplace aux yeux d'un sujet immobile (par exemple regardant à la fenêtre d'un train en mouvement). Le glissement des images sur une large étendue du champ visuel va entraîner un mouvement réflexe de poursuite d'une cible de la scène visuelle, qui, lorsqu'elle disparaîtra du champ de regard, sera suivi d'un mouvement rapide de saccade vers une autre cible en sens opposé.

Ces deux réflexes agissent en symbiose et permettent de conserver au maximum une perception simple de la scène visuelle lors du mouvement.

Les mouvements d'orientation

Il existe plusieurs types de mouvements permettant d'orienter le regard vers un objet d'intérêt et ainsi d'amener son image sur la fovéa, siège de la majorité des photorécepteurs types cônes et zone centrale de la rétine où la sensibilité aux détails et couleurs est maximale. Ces

mouvements permettront donc aux axes visuels des deux yeux de se croiser sur l'objet observé. Nous distinguerons cependant les mouvements conjugués, majoritaires, où les yeux effectueront des rotations de même sens, et les mouvements disconjugués, pendant lesquels les yeux effectuent des rotations en sens opposé.

Mouvements conjugués

➤ Saccade

Considéré comme le mouvement le plus rapide du corps humain (350-500° de rotation/seconde), la saccade va permettre une fovéation de l'image d'un objet se situant à la base sur la rétine périphérique. Ainsi, l'objet d'intérêt sera fixé par le centre de la rétine où la résolution des images est maximale en qualité. Les saccades peuvent être de direction horizontale, verticale ou oblique, volontaires ou réflexes, et vont rendre possible une focalisation rapide du sujet en direction d'un stimulus visuel d'intérêt se trouvant en périphérie dans le champ visuel. Les saccades feront l'objet d'une présentation approfondie dans le chapitre 5).

➤ Fixation

La fixation correspond au maintien des axes visuels sur une cible fixe, donc au maintien des images de cette cible sur les deux fovéas. Elle est en lien direct avec les processus attentionnels et avec l'exploitation cognitive des données visuelles relatives à l'objet d'intérêt. Réalisée en général à la suite d'une saccade et/ou d'un mouvement de vergence, la phase de fixation permet d'immobiliser un maximum les axes visuels et de maintenir ainsi l'angle de vergence approprié. Cependant, il est important de signaler que les yeux ne sont pas complètement immobiles pendant une fixation : des micro-mouvements physiologiques (glissades, micro-saccades...) sont en général constatés et essentiels à la perception d'une image nette (Engbert, 2006). Dans le cadre de notre travail, nous étudierons majoritairement la phase de fixation dans son aspect moteur comme dans son aspect cognitif et temporel, en particulier dans des tâches comme la lecture.

➤ Poursuite

Le mouvement de poursuite va permettre au sujet de maintenir la fixation sur un objet se déplaçant. Cependant, ce déplacement ne devra pas dépasser une certaine vitesse, la poursuite étant un mouvement lent (moins de 50°/seconde) et volontaire. Il se réalise après fovéation, une fois que les axes visuels se croisent déjà sur l'objet, et est donc souvent précédé d'un mouvement de saccade et/ou de vergence.

➤ Torsion

Les mouvements de torsion sont souvent associés à d'autres mouvements et sont assez peu étudiés. Lors de la fixation d'une cible en vision proche, qui nécessite donc la mise en jeu de la convergence, les yeux réalisent aussi des torsions internes lors de l'élévation des lignes de regard, et des torsions externes lors de leur abaissement. Dans le cadre de notre travail, nous n'aborderons pas les cyclotorsions.

Mouvements disconjugués

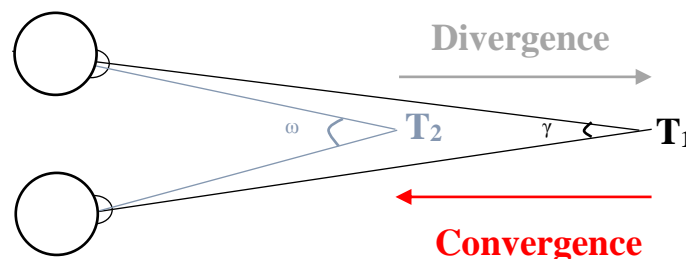
➤ Vergence

Les mouvements de vergence concernent le plan horizontal et sont relatifs à la fixation d'une cible dans la profondeur. Les yeux vont tourner en sens opposé, un mouvement tempo-nasal concernera la convergence des axes visuels vers un objet plus proche quand un mouvement naso-temporal concernera la divergence des axes visuels vers un objet plus lointain. Réalisé avec des temps de latence similaires à ceux de la saccade, ce mouvement est cependant beaucoup plus lent dans son exécution (20°/secondes, à raison d'une durée d'environ 200ms). Contrairement à la saccade, qui elle est un mouvement balistique, la vergence permet un feedback des afférences visuelles pour ajuster le mouvement en cours de réalisation. Comme les saccades malgré tout, ces mouvements peuvent être réflexes ou volontaires.

Le maintien de l'angle de vergence en vision proche, tout comme le maintien de l'effort accommodatif, est essentiel pour conserver une qualité de vision optimale, et focalise la majorité des examens cliniques. Un dysfonctionnement dans ces processus s'avérerait pénalisant, voir handicapant dans certaines activités, comme la lecture ou l'apprentissage, majoritairement réalisées en vision de près. L'étude de la vergence et son interaction avec l'accommodation représentent une première partie importante de notre travail. Par la suite, nous allons présenter en détails les mouvements de vergence, le phénomène d'accommodation et la synergie fonctionnelle qu'il existe entre ces deux processus visumoteurs.

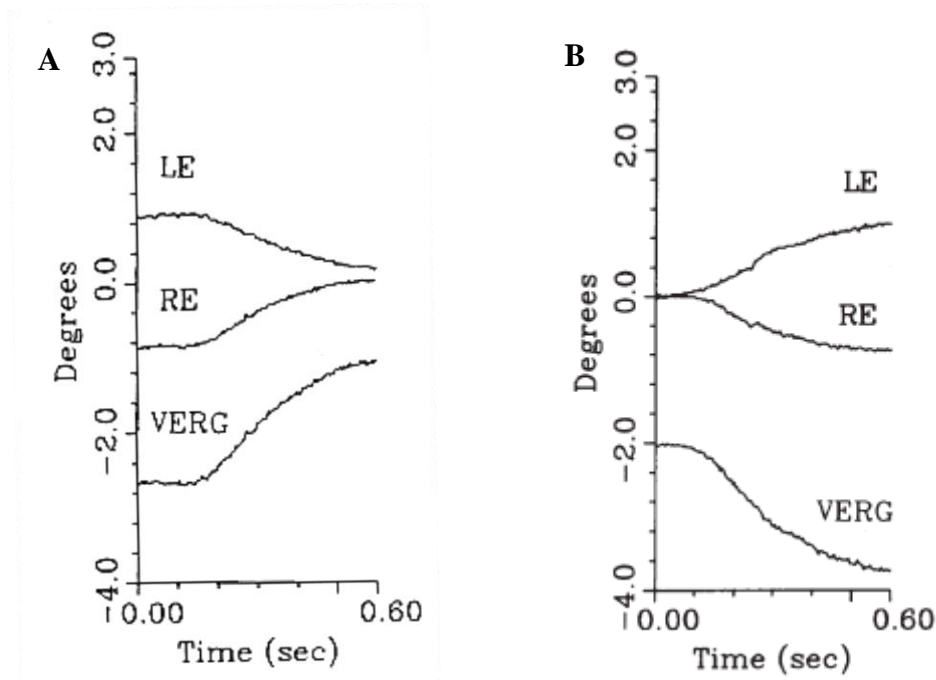
CHAPITRE 2 : Mouvements de vergence

Les vergences désignent avant tout les mouvements oculaires de rotation des deux yeux en sens opposé. Ils sont utilisés lorsque l'objet fixé change de position dans la profondeur, s'éloigne ou se rapproche, ou encore lorsqu'une nouvelle cible est plus éloignée ou plus proche que la première. La condition première de la fusion de deux images rétiniennes étant qu'elles se forment sur des points correspondants ou tout du moins des aires de Panum correspondantes, et plus particulièrement que l'objet fixé le soit avec les deux fovéas, incombant que les lignes de regard se croisent dessus, les mouvements de vergence vont donc avoir une importance considérable, par exemple concernant l'exploration d'une scène visuelle formée d'éléments positionnés à distances différentes entre eux. Les capacités de convergence et de divergence sont très étudiées en optométrie et orthoptie, pratiques cliniques pendant lesquelles les amplitudes maximales sont mesurées. Nous analyserons d'abord le modèle clinique optométrique des composantes de la vergence. Nous approfondirons par la suite les différents aspects fonctionnels des mouvements de vergence, majoritairement grâce aux travaux de Leigh et Zee (2016), Mays et Gamlin (1995), Vernet (2009) et Gaertner (2014).



Mouvements de vergence. Lorsque le sujet passe du point T1 au point T2 plus proche, il effectue un mouvement de convergence, les yeux tournent en direction du nez, son angle de vergence augmente (ω). Lorsqu'il passe du point T2 au point T1 plus lointain, il effectue un mouvement de divergence, les yeux tournent en direction des tempes, son angle de vergence diminue (γ).

Le mouvement de convergence permettra d'observer une cible plus proche ou se rapprochant, le mouvement de divergence permettra d'observer une cible plus éloignée ou qui s'éloigne. Pendant l'observation d'une cible se déplaçant, l'angle de vergence se doit donc de varier en augmentant si elle se rapproche et en diminuant si elle s'éloigne. Pendant une fixation ou lorsque les objets fixés sont sur un même plan (page de livre, écran d'ordinateur, plan fronto-parallèle...), l'angle de vergence se doit d'être maintenu de façon stable dans toutes les directions du regard pour éviter la diplopie et conserver la vision simple de la cible.



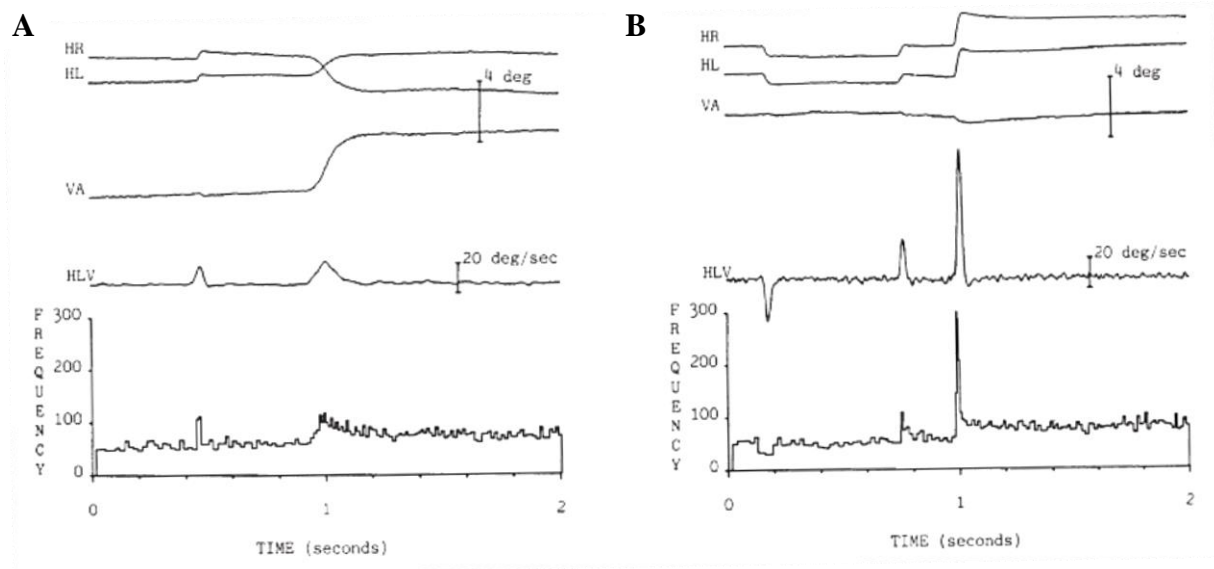
Mouvements de convergence (A) et de divergence (B) enregistrés chez un singe Rhésus. Les tracés de l'œil droit (RE) et de l'œil gauche (LE) témoignent des trajectoires de rotation opposées, et la valeur de l'angle de vergence augmente dans le cas d'un mouvement de convergence (A) et diminue dans le cas d'un mouvement de divergence (B). D'après Leigh et Zee, 2016.

2.1. Caractéristiques dynamiques d'un mouvement de vergence

Le mouvement de vergence est un mouvement lent si on le compare à un mouvement de saccade, abordé ultérieurement : sa latence est d'une part plus importante, la composante accommodative arrivant plus lentement (200 ms) par rapport à la composante issue du mécanisme de vergence de disparité (160ms, Leigh et Zee, 2016). D'autre part, l'exécution du mouvement est généralement comprise entre 150 et 200ms, ce qui en fait un mouvement beaucoup plus lent que la saccade. Les travaux de Robinson (1966) et Mays et al. (1986) ont montré que la commande de vergence était principalement tonique (*step*), cependant il est à noter que des commandes phasiques (*pulse*) et phasiques-toniques (*pulse-step*) ont également été identifiées au même titre que les mouvements de saccades. De ce fait, il existe aussi une séquence principale liant amplitude, vitesse et durée pour les mouvements de vergence.

Si la variation de l'angle de vergence est importante, il a été possible de segmenter le mouvement en deux parties : une phase d'initiation et une phase de complétion (Westheimer et Mitchell, 1969 ; Jones et Stephens, 1989). En observant la forme de la courbe de vitesse d'un mouvement de vergence, on retrouve les spécificités citées par Jones (1980) qui décrivait

une composante « grossière » et une composante « fine ». La première composante correspond à la phase d'initiation, mécanisme préprogrammé en boucle ouverte, qui va déclencher le mouvement et en faire accomplir sa majeure partie. La phase de complétion arrive, elle, en fin de mouvement, et se sert des éléments d'erreurs de disparité restants pour finaliser le mouvement de façon précise (boucle de rétroaction).



Activité d'un motoneurone d'un muscle droit médian, pendant un mouvement de convergence (A) et pendant un mouvement de saccade vers la droite (B). Durant un mouvement de convergence, cette activité est directement liée à la fois à la vitesse du mouvement des deux yeux (représentée par le tracé HLV, tracé de vitesse de l'œil gauche dans le plan horizontal) ainsi qu'à l'angle de vergence souhaité (tracé VA). Durant un mouvement de saccade, sa fréquence de décharge est proportionnelle à la vitesse de l'œil et à sa position. HR : tracé de la position de l'œil droit dans le plan horizontal. HL : tracé de la position de l'œil gauche dans le plan horizontal. D'après Gamlin et Mays, 1992.

Il est malgré tout important de noter les différences retrouvées concernant la nature du mouvement. En effet, dans la plupart des cas pour les mouvements de divergence, les latences mesurées sont plus longues que pour les mouvements de convergence (Tyler et al., 2012). Cependant, cette différence ne se fait pas toujours dans ce sens et on retrouve une certaine variabilité en fonction des individus. L'angle de vergence maintenu avant le déclenchement du mouvement a lui aussi son importance : plus il est important, plus la latence d'un mouvement de divergence sera courte, ce qui n'est pas le cas pour un mouvement de convergence (Alvarez et al., 2005). De façon similaire, lors du paradigme *gap*, la disparition de la première cible influe sur la latence d'un mouvement de vergence en comparaison au paradigme *overlap* : on constate sa réduction comme pour celle des saccades, même si l'effet

observé est de plus faible impact (Takagi et al., 1995), et cet impact est plus important pour un mouvement de divergence que pour un mouvement de convergence (Bucci et al., 2005 ; Coubard et al., 2004). Enfin, la durée d'un mouvement de vergence, à amplitude égale, semble plus longue pour la convergence que pour la divergence, même si l'angle de vergence initial semble, lui aussi, influencer sur la rapidité d'exécution (Kumar et al., 2002 ; Alvarez et al., 1999 ; Zee et al., 1992). De ce fait, toutes ces constatations mènent à l'hypothèse que ces deux mouvements soient contrôlés par différents circuits sous-corticaux.

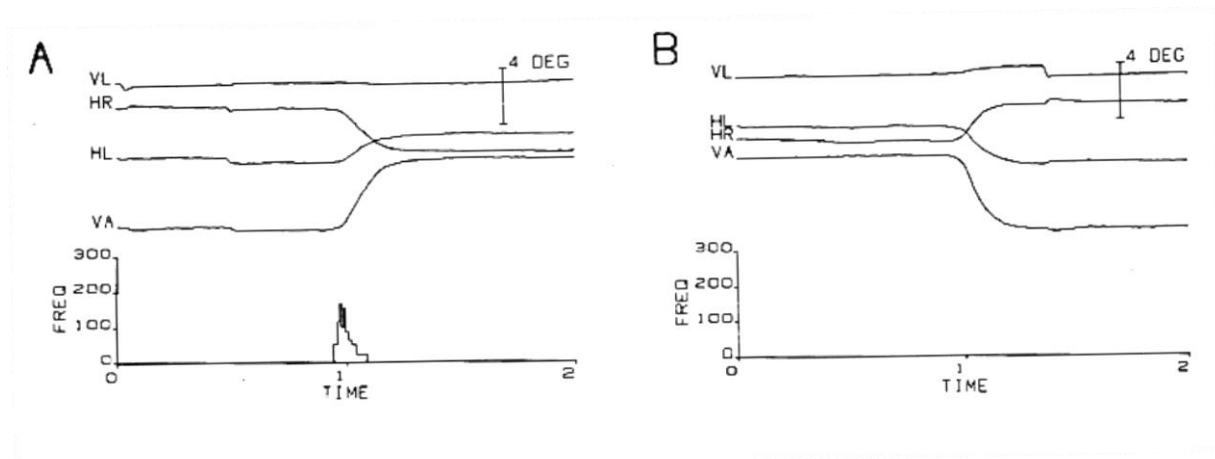
2.2. Motoneurones des vergences et circuits sous-corticaux

Concernant la neurophysiologie des mouvements de vergence, bien que les récentes études nous permettent aujourd'hui de représenter un circuit probable, certaines des structures impliquées ne sont toujours pas clairement identifiées. Dans le cadre de notre travail, nous aborderons majoritairement les mouvements de vergence dans le plan horizontal. Si différentes structures vont ici encore intervenir dans la réponse de vergence, les motoneurones liés aux muscles droits médians et latéraux sont d'une importance primordiale. Il est aussi à noter que les neurones prémoteurs responsables des mouvements de vergence ont été localisés dans deux sites majeurs : la formation réticulée du mésencéphale et la formation réticulée du pont. Malgré tout, on constate aussi une influence du colliculus supérieur (SC) et du cervelet dans les mouvements de vergence.

Concernant le mésencéphale, trois types de neurones de vergence spécifiques ont été isolés (Mays et Gamlin, 1995) au niveau de l'aire supra-oculomotrice (SOA ; Gamlin, 2002). Le premier type de neurones présente une activité tonique, dont la décharge dépend de l'angle de vergence requis et démarre 10 à 30 ms avant le mouvement (Mays, 1984). L'activité de ce groupe de neurones n'est pas affectée par la direction du regard (version), cependant on dénote un nombre moins important de neurones pour les mouvements de divergence que pour les mouvements de convergence. Le deuxième type de neurones présente lui une activité phasique (*burst*), qui sera directement en lien avec la vitesse du mouvement effectué (Mays et al., 1986). Ainsi, le nombre de leur potentiel d'action sera directement proportionnel à l'amplitude du mouvement à effectuer en vergence. Ici encore, on dénote un nombre plus important de neurones codant pour la convergence que pour la divergence. Le troisième type de neurones combine pour sa part une activité tonique à une activité phasique, à la fois dépendante respectivement de l'angle de vergence et de la vitesse du mouvement.

Cette aire supra-oculomotrice, présentant une activité liée à la réponse accommodative, sera abordée dans la partie XX.

Cependant, plusieurs études ont montré qu'en cas de variation dissociée de l'accommodation ou de la vergence seulement, la majorité de ces neurones gardait une activité de vergence (Zhang et al., 1992 ; Judge et Cumming, 1986).



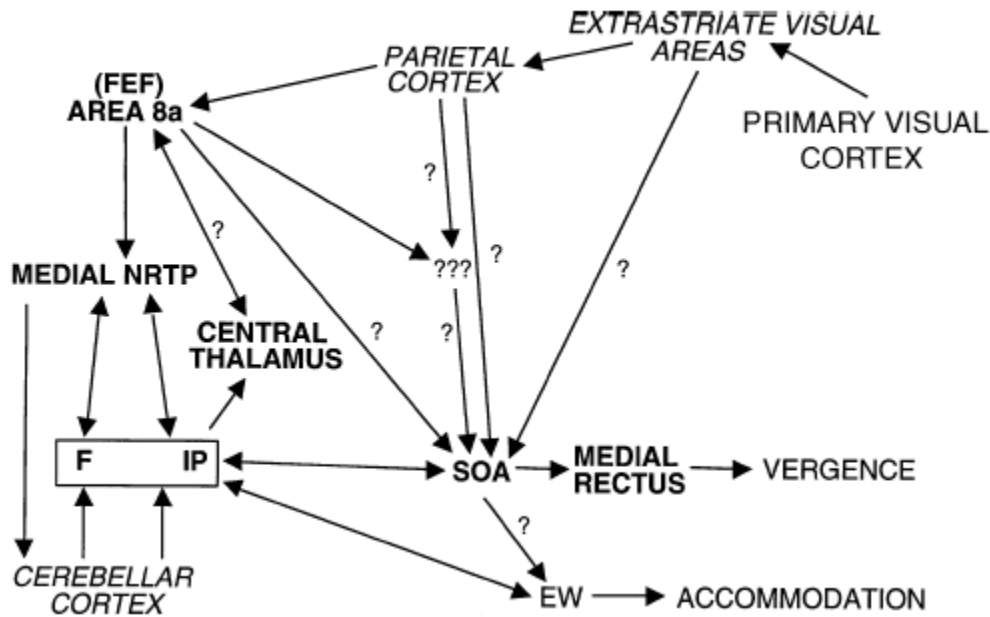
Exemple de l'activité d'un neurone phasique répondant pendant un mouvement de convergence (A) et pour lequel la fréquence de décharge sera proportionnelle à l'amplitude du mouvement mais n'interviendra pas ensuite, dans le maintien de l'angle de vergence ni en cas de mouvement de divergence (B). D'après Mays et al., 1986.

Concernant les neurones du pont, le rôle des neurones internucléaires oculomoteurs et abducens reste mal connu et identifié concernant les mouvements de vergence. Chacun de ces neurones présente des projections vers les autres noyaux oculomoteurs via le faisceau longitudinal médian (MLF), qui lui s'avère transmettre des signaux relatifs aux vergences (Gamlin et al., 1989). Le noyau réticulaire tegmental du pont (NRTP), déjà très impliqué dans les mouvements de saccades, pourrait donc aussi l'être concernant les vergences via ses connexions avec les noyaux abducens, et ce pour plusieurs raisons : d'abord, des stimulations effectuées au sein de ces neurones ont provoqué des mouvements de vergence associés à des mouvements de saccades (Gamlin et Clark, 1995) ; d'autre part, le NRTP présente des projections vers le cervelet et pourrait être à l'origine d'une nouvelle source d'information de disparité et de vergence vers cette structure (Leigh et Zee, 2016) ; enfin, le NRTP reçoit des projections de nombreuses aires différentes, dont le cortex frontal, qui pourrait être à l'origine de signaux prémoteurs dans les mouvements de vergence (Gamlin, Yoon, Zhag, 1996).

Le colliculus supérieur (SC) va lui aussi, au même titre que pour les saccades, intervenir dans les mouvements de vergence, et plus particulièrement son pôle rostral. Plusieurs études ont fait état d'une activité modulée de ses neurones déchargeant usuellement pendant une saccade si un mouvement de vergence est réalisé en combinaison (Walton et Mays, 2003). Aussi, la stimulation du pôle rostral du SC provoque la suppression partielle de la vergence voir même de la saccade (Chaturvedi et Van Gisbergen, 2000). Enfin, une atteinte de la myélinisation de ses structures est en lien avec une paralysie de l'accommodation et de la vergence (Ohtsuka et al., 2002). Le pôle rostral du SC présente en effet des projections vers les neurones omnipauseurs (OPN), initialement responsables de l'inhibition des neurones générateurs de saccades. Le silence des OPN permet donc à un mouvement de saccade de se produire, mais aurait aussi une action similaire sur les mouvements de vergence. Par exemple, Busettini et Mays (2003) ont montré qu'un mouvement de convergence s'accompagnait d'une diminution d'activité des OPN alors que la stimulation des OPN avait tendance à ralentir les mouvements de vergence (Mays et Gamlin, 1995). Malgré tout, de nombreuses interrogations demeurent sur le fonctionnement même de l'inhibition des OPN sur toute la durée d'un mouvement.

Le cervelet a lui aussi sa part d'influence sur les mouvements de vergence. Plusieurs études réalisées sur des patients présentant des lésions ont fait état de problèmes d'alignement des axes visuels, de paralysie de la convergence ou de mouvements disconjugués dissymétriques (Holmes, 1922 ; Versino et al., 1996 ; Miles et al., 1980). Des études d'imageries ont par ailleurs montré une activité des hémisphères cérébelleuses et du vermis pendant des réponses en vision de près (Richter et al., 2004). En apport, des études réalisées chez le singe sont aussi venues confirmer cette relation (Westheimer et Blair, 1973; Miles et al., 1980), et trois structures en son sein ont pu être isolées concernant la réponse de vergence (Gamlin, 2002 ; Zhang et Gamlin, 1998 ; Zhang et Gamlin, 1996 ; May et al., 1992) : le noyau postérieur interposé (PIN), dont l'activité est retrouvée pendant des réponses en vision de loin (divergence, désaccommodation) ; le noyau fastigial (FOR), dont la réponse se fait plus particulièrement en vision proche (convergence, accommodation) ; le vermis dorsal, qui lui projette vers le PIN et le FOR. Des lésions au niveau du vermis dorsal chez le singe seraient responsables d'ésodéviations (angle de vergence trop important voir strabisme convergent), de déviation incommittante (variant en fonction de la direction du regard) et de déficiences dans les vergences d'adaptation (voir partie XX, Takagi et al., 2003). Des études par PET scan sur des humains ont montré par ailleurs une augmentation de l'activité du vermis dorsal dans des

tâches de discrimination binoculaire (Gulyàs et Roland, 1994). Malgré tout, le rôle exact du cervelet dans les mouvements de vergence reste encore à éclaircir.



Circuits neuronaux impliqués dans le contrôle de la vergence et de l'accommodation. F : noyau fastigial ; IP : noyau postérieur interposé ; EW : noyau d'Edinger-Westphal ; SOA : aire supra-oculomotrice ; FEF : champ oculomoteur frontal ; NRTP : noyau réticulaire tegmental du pont. D'après Gamlin (2002)

2.3. Aires corticales impliquées dans le contrôle de mouvements de vergence

Comme pour le contrôle des saccades, les aires corticales impliquées dans le contrôle de la vergence sont diverses. Cependant, de façon similaire aux mouvements de saccades, les aires visuelles postérieures sont plus identifiées comme intervenant dans les processus sensoriels et à l'origine de mouvements réflexes, quand les aires frontales sont plus définies comme intervenant dans les mouvements volontaires (Gamlin, 1999 ; Gamlin, 2002). De nombreuses études réalisées chez l'Homme à l'aide de l'imagerie et des stimulations transcrâniennes ont permis de mieux comprendre les mécanismes du contrôle des vergences, faisant intervenir les mêmes aires (frontales, occipitales et pariétales) que pour les saccades.

2.3.1. Contribution du cortex visuel primaire

Comme développé précédemment à propos de la construction de la perception du relief, des études réalisées sur des primates ont montré l'activation de certains neurones du cortex V1

dans la détection de disparités de position des images rétiniennes (Prince et al., 2000 ; Trotter et al., 2004). En lien direct avec ces considérations, des stimulations répétées au niveau du cortex occipital chez l'Homme ont provoqué une perte globale de perception du relief (Takayama et Sugishita, 2001). La perception du relief, qui provient directement de l'analyse des disparités rétiniennes et de la position des images disparates en diplopie physiologique, a un impact direct, même minime, sur les mouvements de vergence, étant donné qu'une part d'entre eux provient d'une composante « proximale ». De surcroît, l'activité du cortex V1 est aussi stimulée par la perception d'une image floue (Richter et al., 2004), qui entraîne par la suite une réponse accommodative pour tenter de refocaliser l'image sur la rétine, en lien possible avec la composante accommodative du mouvement. Kapoula et al. (2002) ont réalisé une étude d'enregistrements des potentiels évoqués qui témoigne ici encore de l'activité plus importante du cortex occipital avant les mouvements de vergence pure, plus particulièrement en divergence, qu'avant des mouvements de saccade ou des mouvements combinés saccade-vergence. Étant donné l'implication rapide et étendue des régions pariétales et centrales en association, les auteurs ont expliqué ce rehaussement d'activité par le fait que les mouvements de vergence pure ne sont pas habituels pour l'Homme dans la vie quotidienne, et nécessitent un effort plus important.

2.3.2. Contribution du lobe frontal

Comme dans les réponses de saccade, l'activité enregistrée de certains neurones du champ oculomoteur frontal (FEF) a montré que le lobe frontal était lui aussi impliqué dans les réponses de vergence. Une cible se déplaçant de façon continue ou par pas dans la profondeur entraîne un regain d'activité de ces neurones (Gamlin et Yoon, 2000 ; Fukushima et al., 2004 ; Fukushima et al., 2002). Le champ oculomoteur supplémentaire (SEF) serait lui aussi impliqué dans les réponses de vergence sur des cibles se déplaçant dans la profondeur, et ceci en lien avec l'anticipation de la direction de cette cible (Fukushima et al., 2004). Enfin, le cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC) serait une autre région du lobe frontal intervenant dans les mouvements de vergence : l'application d'une stimulation magnétique transcrânienne (TMS) sur cette aire a en effet provoqué une diminution dans la latence des mouvements de vergence (Coubard et al., 2003). De façon identique aux mouvements de saccades, cet effet peut s'expliquer par le fait que la TMS provoquerait une annulation de l'inhibition appliquée par le lobe frontal sur le colliculus supérieur, accélérant ainsi la préparation du mouvement.

2.3.3. Contribution des aires temporales (MT) et supéro-temporales (MST)

Plusieurs régions des aires temporales montrent une activité pendant les mouvements de vergence : d'une part, les aires visuelles secondaires (médio-temporales V5 et V3A chez l'Homme) semblent importantes dans la perception binoculaire du relief (DeAngelis et Cumming, 1998 ; Backus et al., 2001), d'autre part, certains neurones des aires visuelles supéro-temporales (MST) présentent une activité accrue lors de l'initiation d'un mouvement de vergence (Takemura et al., 2001) quand d'autres répondent pendant des mouvements de vergence pure ou de poursuite-vergence souples (Akao et al., 2004).

2.3.4. Contribution du lobe pariétal

Chez le primate, l'aire intrapariétale latérale (LIP) s'est avérée d'une grande importance dans l'analyse des disparités rétinienne en lien avec la perception du relief. Les neurones de cette région codent en effet pour un signal en relation avec cette disparité qui évolue en intensité avec la profondeur de fixation (Genovesio et Ferraina, 2004), ce qui permettrait l'élaboration d'un signal prémoteur utile à diriger le regard dans l'espace 3-D. De plus, Gnadt et Mays (1995) ont montré que d'autres neurones de cette région déchargeaient non seulement au moment des saccades, mais aussi et plus particulièrement lors des mouvements combinés saccade-vergence, lorsque que le regard devait se focaliser à une profondeur particulière. Le LIP correspond approximativement au cortex pariétal postérieur (PPC) chez l'Homme. L'étude de stimulation trans magnétique du PPC d'Elkington et al. (1992) a par exemple montré que cela provoquait une divergence plus importante en amplitude au début d'une saccade. Ils en ont déduit que le PPC jouait un rôle important dans l'élaboration des fins mouvements de vergence et occupait une place prépondérante dans le contrôle de l'angle de vergence à maintenir pendant la fixation. Cette idée a été renforcée par les résultats de l'étude réalisée sur des personnes présentant une lésion au niveau du PPC : le contrôle de la vergence est en effet détérioré dans cette population (Fowler et al., 1989).

Les études réalisées à l'aide de la TMS ont montré un fonctionnement particulier du PPC, et son implication dans le maintien de l'attention visuelle. L'activation du PPC droit par la TMS a entraîné un allongement des latences de vergence (Kapoula et al., 2001, 2005). Les auteurs voient ici une perturbation par la TMS du désengagement de l'attention visuelle. De plus, il a aussi été montré que la TMS perturbait les mouvements de vergence eux-mêmes ainsi que les mouvements combinés saccade-vergence lorsqu'elle était appliquée tôt sur le PPC droit (130ms avant le début du mouvement). Si elle est appliquée de façon plus tardive (jusqu'à

110ms avant le mouvement), elle perturbera par contre les mouvements de saccade et de divergence (Kapoula et al., 2004). Cette spécificité pousse les auteurs à privilégier l'hypothèse que le désengagement de la fixation se fait plus tôt dans les mouvements de convergence par rapport au mouvement de divergence.

CHAPITRE 3 : Le phénomène d'accommodation, vision nette à toute distance

La capacité de voir net un objet se déplaçant dans la profondeur est rendue possible par le mécanisme d'accommodation, qui va permettre d'observer des objets dans différents plans et de pouvoir récupérer un maximum de détails en optimisant la résolution de leur image. Plus important encore, les activités comme la lecture et la plupart des apprentissages théoriques se déroulent majoritairement à distance proche et fixe. Dans ces conditions particulières, c'est l'accommodation qui va permettre à l'œil d'adapter et de maintenir son état réfractif afin de conserver l'image sur la rétine. La réponse accommodative dans le temps se doit donc d'être stable et précise afin d'assurer une qualité d'image optimale. Dans le cadre de notre travail d'étude, nous nous sommes donc intéressés plus particulièrement au mécanisme d'accommodation et à son fonctionnement étant donné son implication majeure.

3.1. Biomécanisme

La réponse accommodative, assurée par l'action des muscles ciliaires, est en général déclenchée par la détection d'une image floue par le cortex visuel, et typiquement quand les objets fixés sont en vision proche. Cependant, dans le cas de certaines amétropies mal ou non corrigées, il peut arriver que l'individu ait un effort accommodatif supplémentaire à accomplir pour voir net au loin.

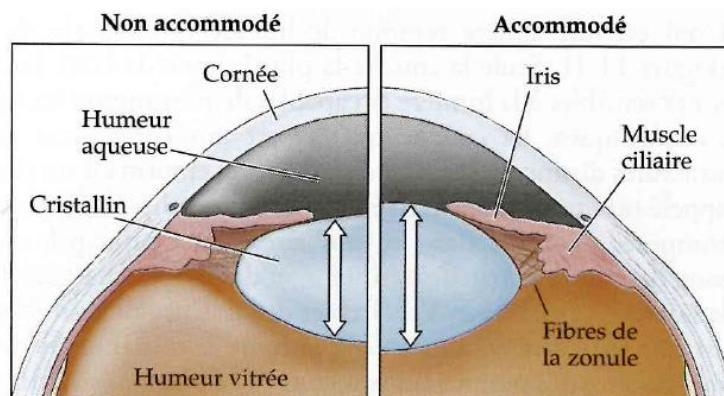


Schéma d'un cristallin non accommodé (à gauche) et accommodé (à droite). L'accommodation provoque le bombement et l'épaississement du cristallin, augmentant de façon globale la puissance de l'œil et provoquant une convergence plus importante des rayons lumineux vers l'axe optique. D'après Purves et al., 2015

Ce mécanisme est avant tout rendu possible anatomiquement par le cristallin. Assimilé très souvent à une lentille mince optiquement parlant, il possède une structure transparente, mais de surcroît flexible et capable de se déformer sous l'action des muscles ciliaires. Les muscles

de Rouget-Müller, innervés par la voie parasympathique, lors de leur contraction, vont provoquer un relâchement au niveau des zonules de Zinn, et donc par la même occasion un épaississement et un bombement du cristallin : le couple oculaire va accommoder, le cristallin gagne en convexité et la focalisation optique de l'œil sur un objet plus proche s'accomplit (Helmholtz, 1909). Leurs antagonistes, les muscles de Brücke, innervés par la voie sympathique, vont eux avoir une action inverse sur les zonules puisqu'ils vont les étirer de nouveau, le cristallin va reprendre sa forme d'origine : le couple oculaire relâche l'accommodation, ou désaccommode, la focalisation optique de l'œil pour une distance plus lointaine s'accomplit. Il est à noter cependant que l'accommodation ne peut se relâcher indéfiniment, pour des raisons anatomiques bien entendu. Au repos, la vergence d'un cristallin est de l'ordre de 20δ .

La réponse accommodative se fait au départ de façon automatique en réponse à un flou sur la rétine. Si on prend l'exemple d'une réponse classique à la suite d'un flou, ce sont les cônes, en grande partie, qui codent pour les hautes fréquences spatiales, qui vont transmettre ce flou, signe d'une image défocalisée. Ces signaux additionnés sont transmis au cortex visuel par l'intermédiaire des couches magnocellulaires des corps genouillés latéraux. Les cellules du cortex répondent ensuite en élaborant un signal sensoriel de flou. Ce signal est dès lors transmis aux aires pariétales et temporales ainsi qu'au cervelet pour être traité ou diffusé.

Le signal supranucléaire passe ensuite par le noyau d'Edinger-Westphal (EW, ou noyau oculomoteur), où la commande motrice va être formulée. Le message nerveux est transmis enfin par le nerf oculomoteur commun III, le ganglion ciliaire puis les nerfs ciliaires courts, en majorité, pour arriver aux muscles ciliaires, qui par leurs contractions entraîneront une modification de la convexité du cristallin. L'accommodation est un phénomène binoculaire, l'influx nerveux est envoyé simultanément aux 2 yeux et avec la même intensité (Loi de Hering).

D'un point de vue purement optique, on quantifie l'accommodation mise en jeu avec la dioptrie (δ) comme unité. En effet, comme indiqué au préalable, on prend en général en compte que l'œil a une puissance intrinsèque « au repos accommodatif ». Lorsque l'individu accommode, la puissance de l'œil change. La différence de puissance entre l'œil au repos et l'œil accommodé nous donnera à l'arrivée la quantité d'accommodation mise en jeu par

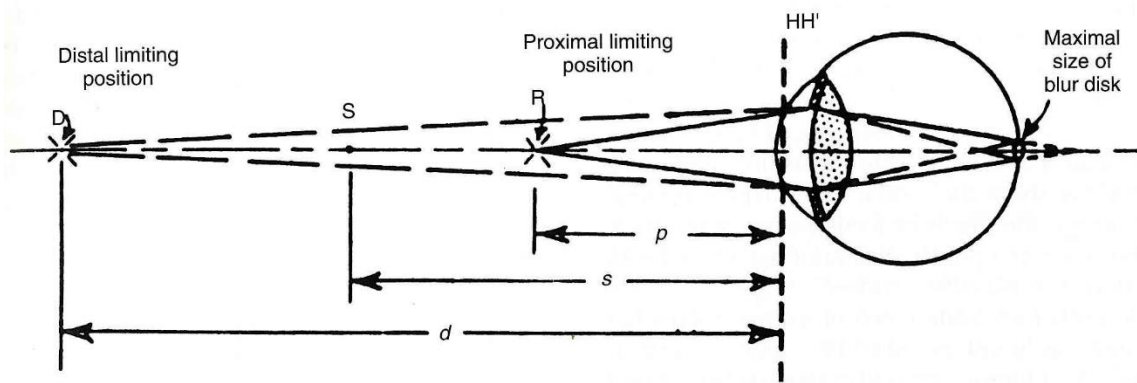
l'individu. Ce lien est avant tout distal, et il est donc beaucoup plus aisé de quantifier ainsi l'effort accommodatif.

3.2. La réponse accommodative et la profondeur de champ

Si la réponse accommodative est en général précise et peut être maintenue, il apparaît que son amplitude de mise en jeu ne correspond pas toujours à la valeur théorique liée à la proximité dioptrique de l'objet. Si nous assimilons l'œil à un système optique composé de plusieurs dioptries et d'une pupille d'ouverture, il faut malgré tout prendre en compte, dans le phénomène d'accommodation, comme dans tout système optique, l'existence de la profondeur de champ et de la distance de mise au point, ou profondeur de focalisation. L'optique géométrique classique fait référence au stigmatisme rigoureux, c'est-à-dire que pour un objet donné à une position donnée dans l'espace objet correspondra une seule et unique image donnée dans le milieu image au travers du système.

Tout système optique n'est cependant pas toujours focalisé strictement sur un seul point de l'espace. Il existe en effet une zone entière pour laquelle, sans changement de focalisation, la netteté de l'image peut encore être perçue « nette ». La notion de profondeur de champ doit donc être prise en compte en ce qui concerne l'accommodation, en effet, il s'agit là de mise au point d'une image sur l'écran rétinien optiquement parlant. Il est usuel de conceptualiser la profondeur de focalisation au niveau de l'œil comme une tolérance neurologique pour une erreur du système. Elle est définie par la variation dans la proximité de l'image, au travers d'un système optique, qui peut être tolérée sans provoquer de perte d'acuité objective (Cline, Hoffstetter et Griffin, 1989). Rapportée ensuite dans le milieu objet, elle correspond là encore à une distance qu'on appellera profondeur de champ (Ogle, 1968). Les deux points extrêmes qui la délimiteront représenteront les limites de profondeur dans l'espace réel dans lequel l'individu perçoit l'objet net quel que soit sa position à l'intérieur, sans faire varier sa réponse accommodative, donc en gardant le même état réfractif. Pour simplifier, on peut en conclure qu'une très légère défocalisation peut être tolérée par l'individu sans produire de perception de flou. Campbell (1957) étudia le phénomène en profondeur, appliqué à l'œil humain. Pour une cible donnée et sous des conditions de test optimales, avec des pupilles d'en moyenne 3mm de diamètre, la profondeur de focalisation s'élevait à $\pm 0,30\delta$. Ces résultats sont retrouvés dans la plupart des études sur le sujet (Ogle et Schwartz 1959 ; Tucker et Charman 1975 ; Charman et Whitefoot 1977). Les valeurs extrêmes retrouvées dans des études similaires font cependant état de retards accommodatifs pouvant aller de $\pm 0,02\delta$ (Oshima

1958) à $1,25\delta$ (Von Bahr, 1952). Cette réalité qu'est la profondeur de focalisation va permettre au système visuel une certaine flexibilité vis-à-vis de la netteté de la cible fixée. En effet, il ne lui est donc pas nécessaire d'enclencher une accommodation qui corresponde exactement à la demande en termes de dioptrie, compte tenu du fait qu'une « légère défocalisation » peut être tolérée sans provoquer de perte de qualité d'image notable. L'acuité visuelle n'est donc pas forcément un indicateur précis pour évaluer la qualité de la réponse accommodative : une bonne acuité visuelle dans des conditions de vision proche n'apporte pas la garantie d'une focalisation optimale sur la rétine, et il est souvent nécessaire en clinique d'aller mesurer objectivement la position du plan d'accommodation réel par rapport à la cible pour s'en assurer.

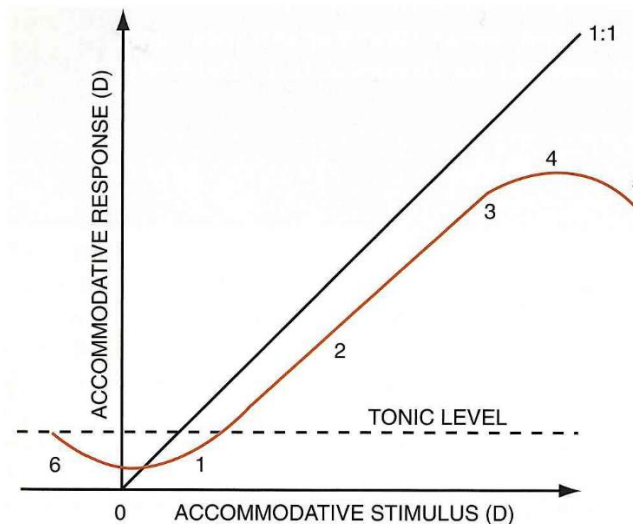


Représentation de la profondeur de champ lorsque le sujet accommode d'une certaine valeur pour voir le point S net en amenant son image sur la rétine. Toute une zone en profondeur, allant de D à P, est alors perceptible de façon nette elle aussi. Ce phénomène optique est lié à la taille de la pupille, la profondeur de l'œil et la taille des taches de diffusion (blur disk). Tiré de Benjamin et al., 2006.

La réponse en convergence et en accommodation mesurée objectivement lors de conflits en partie induits par des verres sphériques concaves (stimulant positivement l'accommodation) a confirmé son existence. La réponse accommodative mesurée lors du port de verres sphériques de -2δ était en moyenne de 1.18δ dans l'étude de Bharadwaj et al. (2009) pour une cible située à 80cm, laissant une erreur de focalisation (lag d'accommodation) de 0.82δ en moyenne. Ce résultat, qui présente des similitudes avec ceux d'autres études (Fincham & Walton, 1957 ; Jaschinski, 1997; Ogle et al., 1949; Ramsdale & Charman, 1988; Semmlow & Hung, 1979), témoigne de la flexibilité supplémentaire apportée par la profondeur de focalisation pour permettre à l'individu de maintenir une vision nette sans forcément accomplir l'entièreté de l'effort en comparaison au défaut induit. Cette notion de retard accommodatif permise par la profondeur de focalisation est très importante cliniquement, car sa mesure permet en partie de

diagnostiquer la présence de dysfonctionnements accommodatifs, et nous apporte aussi des informations sur l'amplitude exacte d'accommodation mise en jeu.

Le retard accommodatif (ou lag) est retrouvé chez la grande majorité des individus lors de tâches réalisées en vision de près. Malgré tout, la réponse accommodative dépend aussi de la distance à laquelle la cible est observée.



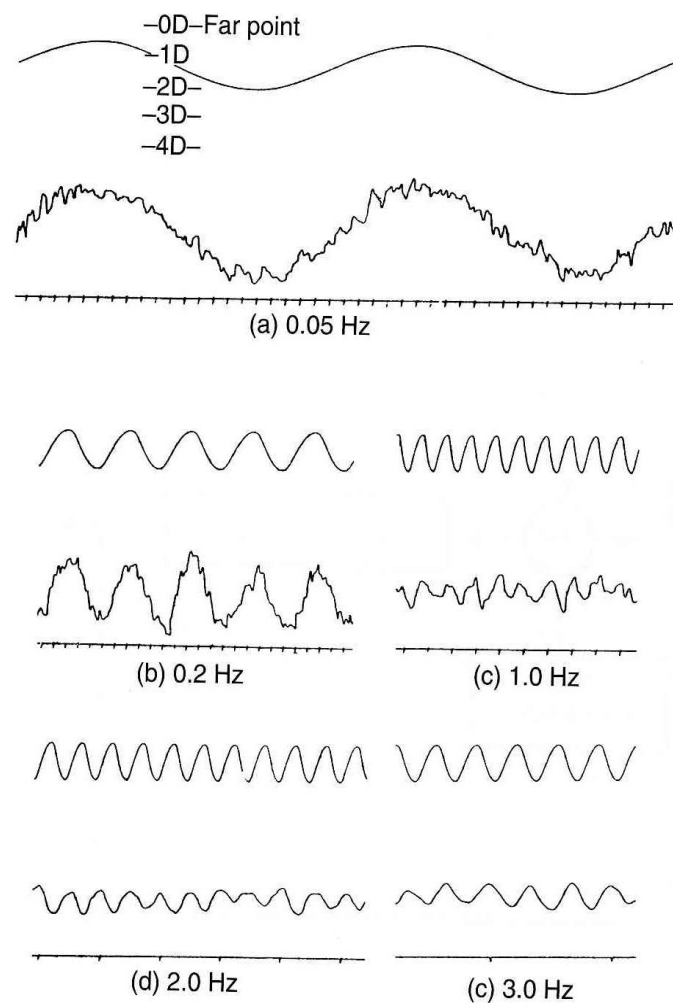
Courbe représentant la réponse accommodative moyenne en fonction de la demande (Droite de Donders). Lorsque la cible est éloignée (à plus d'1m, partie 1), la tendance est en général à la sur-accommodation. Sur une plage dépendante de la réserve maximale d'accommodation de l'individu, nous allons retrouver un lag, retard accommodatif, à des distances plus proches (parties 2 et 3). La réponse a donc tendance à se rapprocher du niveau tonic retrouvé dans l'obscurité (partie 6). Lorsque la cible est trop proche et que l'amplitude maximale d'accommodation est atteinte, le retard se fait très rapidement de plus en plus ample, jusqu'à la perception floue (parties 4 et 5). D'après Benjamin et al., 2006.

Sur la figure précédente, on constate que la réponse accommodative en vision proche est toujours plus faible que ce qui serait attendu exactement, optiquement parlant, et représentée par une droite de demande. On retiendra tout de même une partie très linéaire, pendant laquelle sur un intervalle particulier, le retard accommodatif est quasiment de la même valeur (entre 0,7 et 1,0δ, Hung et Ciuffreda, 1983). Cependant, lorsque la demande en accommodation devient trop importante et se rapproche de la réserve maximale de l'individu, le système visuel a de plus en plus de difficultés à se focaliser sur sa cible, le retard accommodatif se fait de plus en plus grand, jusqu'à ce que même la profondeur de focalisation ne permette plus au sujet de la percevoir net. On assiste alors à une chute de l'accommodation mise en jeu, l'image ne pouvant plus être perçue nettement. Il est donc

physiologique de retrouver un léger « Lead » d'accommodation en vision lointaine et un léger « lag », retard accommodatif, en vision rapprochée (Heath, 1956). Plusieurs méthodes sont possibles pour le mesurer, comme par exemple les méthodes objectives à l'aide d'un skiascope (méthode clinique habituelle) ou de certains autorefractomètres automatiques, ou les méthodes subjectives avec des tests Rouge/Vert ou des croix de Jackson et des Cylindres Croisés Fixes.

3.3. Les caractéristiques de la dynamique accommodative

Le système visuel est capable de répondre de façon précise et rapide à une stimulation de l'accommodation. En ce qui concerne la vitesse de réponse, il faut prendre en compte un temps de réaction qui est de l'ordre de 370ms (Campbelle et Westheimer, 1959). Pour ce qui est de la réponse accommodative en elle-même, on peut l'approcher par un modèle de fonction exponentielle, avec une constante de temps approximativement comprise entre 200 et 250ms (Shirachi, Liu et Lee, 1978).



Réponses accommodatives à un stimulus variant d'une demande de 0 à 2δ de façon sinusoïdale. D'après Kasai et al., 1973.

La réponse totale approcherait donc une seconde si on prend en compte le temps de latence et le temps effectif à la mise en place du mécanisme. Le pic de vélocité, en termes de dioptries, dépend bien entendu de l'amplitude d'accommodation demandée, cependant on relève des valeurs allant jusqu'à 10δ/sec pour les demandes les plus fortes (Ciuffreda, Kruger, 1988).

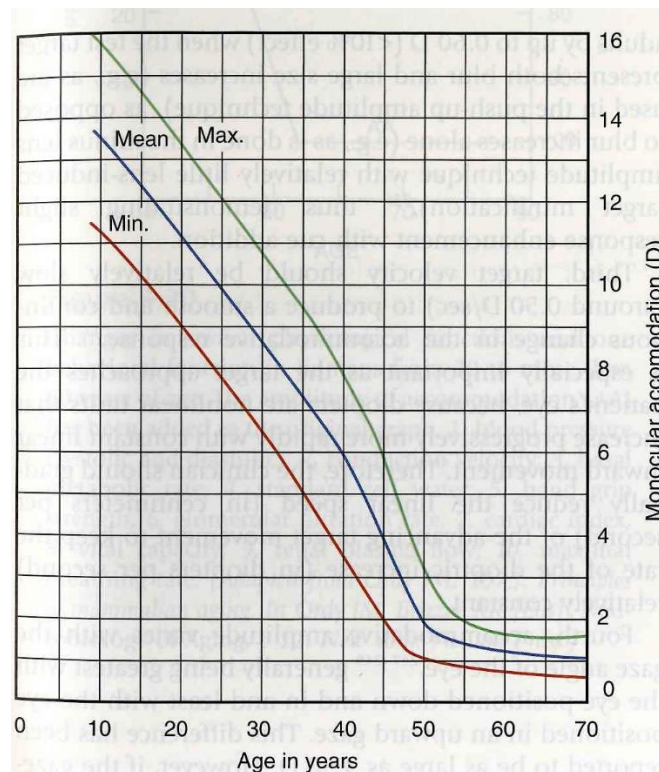
Dans le cas d'une cible statique, on a remarqué une certaine stabilité dans la réponse accommodative. Le système visuel est donc capable de stabiliser correctement son accommodation pour une distance précise, afin de voir net sur la durée. Malgré tout, on constate tout de même des micro-fluctuations imperceptibles par l'individu, allant de +/- 0,02δ à 0,2δ (Ciuffreda, 1991 ; Campbell et al., 1959 ; Charmann et Heron, 1988). Le rôle précis de ces microfluctuations reste controversé, cependant on estime aujourd'hui que les oscillations de basses fréquences joueraient un rôle direct dans le contrôle de l'accommodation par l'individu (Ciuffreda, 1991), alors que celles de hautes fréquences seraient un épiphénomène lié à la tension artérielle (Charmann et Heron, 1988).

D'un point de vue dynamique maintenant, les fluctuations d'accommodation liées à des changements de position de l'objet dans la profondeur ou induites par des verres sphériques nous permettent d'avoir des précisions concernant la flexibilité accommodative. Si la mesure de la réponse accommodative sur une cible statique est en général très utilisée dans la pratique clinique, évaluer la vélocité avec laquelle l'accommodation peut varier chez un sujet présente aussi un réel intérêt. En effet, la capacité à passer rapidement d'un état accommodatif « au repos » (focalisé en vision de loin) à un état « accommodé » (focalisé en vision proche) s'avère essentielle dans les activités de tous les jours, et des désordres dans ce domaine sont de plus en plus rencontrés aujourd'hui dans la pratique clinique, liés majoritairement à l'évolution des comportements visuels et à la sédentarisation. Jusqu'à maintenant surtout mesurée dans le domaine clinique à l'aide de tests subjectifs comme le rock accommodatif (Scheiman et al., 2011 ; Hennessey et al., 1984 ; Kulp et al., 2009), cette évaluation fait partie intégrante des diagnostics de dysfonctionnement de la fonction accommodative (Scheiman et Wick, 2014).

L'avancée des technologies nous a cependant permis de gagner en précision récemment et la flexibilité accommodative est désormais majoritairement évaluée expérimentalement à l'aide d'auto-réfracteurs (Bharadwaj et al., 2005 et 2006 ; Vilupuru et al., 2005 ; Kasthurirangan et al., 2003) qui permettent d'observer en temps réel et à haute fréquence les fluctuations de l'état réfractif du couple oculaire pendant des variations d'accommodation.

3.4. L'amplitude d'accommodation maximale

L'amplitude d'accommodation maximale représente la quantité maximale d'accommodation qu'un individu est capable de mettre en jeu, sa réserve maximale d'accommodation, en quelque sorte l'effort maximal qu'il/elle est capable de mettre en jeu pour voir net une cible. Cette cible sera la plus proche qu'il/elle pourra percevoir de façon nette alors qu'il est parfaitement corrigé (Ciuffreda, 1991). On remarque cependant qu'entre les âges de 5 (Eames 1961, Turner 1958, Wold 1967) et de 52 ans (Mordi, 1991 ; Mordi et Ciuffreda, 1998 ; Duane, 1922 ; Borish, 1970 ; Donders 1864 ; Koretz et al. 1989), l'amplitude maximale d'accommodation ne fait que diminuer. Cette diminution se fait sur un modèle plutôt linéaire, à raison en moyenne de $0,30\delta/\text{an}$ (Hofstetter, 1965), jusqu'à l'âge de 40-45 ans, après lequel les symptômes de la presbytie se font ressentir.

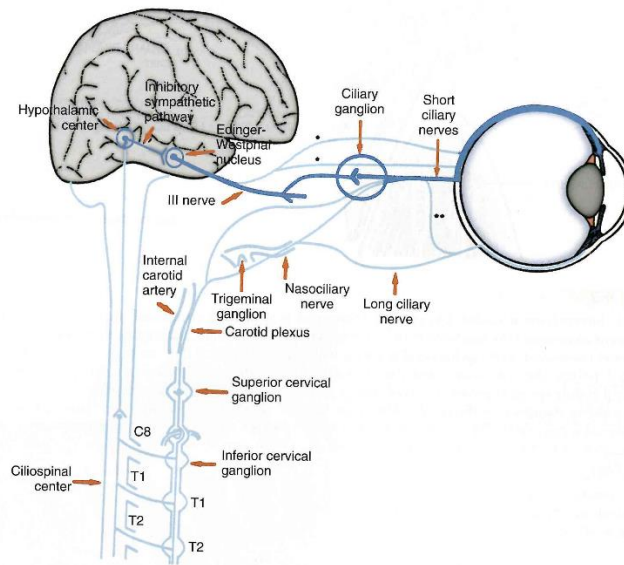


Représentation de l'amplitude d'accommodation en fonction de l'âge, d'après Benjamin et al., 2006 et tiré des travaux de Duane.

L'amplitude maximale d'accommodation, au même titre que le positionnement ou la mesure de la réponse accommodative, servent d'outils cliniques afin de diagnostiquer des dysfonctionnements accommodatifs pour les ophtalmologistes, les orthoptistes et les optométristes (Scheimann et Wick, 2014 ; Duke-Elder, 1949). Concernant l'amplitude maximale, il est en effet possible, comme exposé plus haut, de la rapporter à la valeur attendue en fonction de l'âge du sujet. Une réserve accommodative en deçà des moyennes, plus particulièrement lorsque la personne n'a pas atteint la presbytie, témoigne d'une qualité du mécanisme d'accommodation amoindrie et nécessite en général un approfondissement (réfraction exacte, examen sous cycloplégie...).

3.5. Circuits sous corticaux et corticaux de l'accommodation

Afin d'étudier les circuits corticaux et sous-corticaux de la réponse accommodative, nous nous appuyerons en grande majorité sur les études de Mc Dougal et Gamlin (2015), Gamlin et al. (1994, 1999), Mays et Gamlin (1995), Judge et Cumming (1986) et Zhang et al. (1992). Si les innervations sympathiques et parasympathiques interviennent dans les variations d'accommodation, de nombreux travaux réalisés en majorité sur des primates ainsi que sur des humains ont montré la prédominance de l'action parasympathique dans la réponse accommodative. En effet, comme expliqué précédemment, c'est la branche parasympathique qui va entraîner une variation positive et potentiellement d'amplitude importante de l'accommodation dans un laps de temps très court (inférieur à 1 seconde ; Gamlin et al., 1994 ; Tornqvist, 1967), en comparaison de l'action de la branche sympathique qui elle entrainera un relâchement de manière beaucoup plus lente (10 à 40 secondes) et d'amplitude bien moindre (environ 1.5 dioptries ; Tornqvist 1966 et 1967 ; Gilmartin 1986), et de ce fait intervenant majoritairement dans le relâchement de vision de loin. Les travaux d'Ostrin et Glasser (2010) sont venus plus récemment confirmer que l'action sympathique restait très faible, tant dans la dynamique accommodative que dans les variations d'accommodation, voir même dans sa réponse statique.

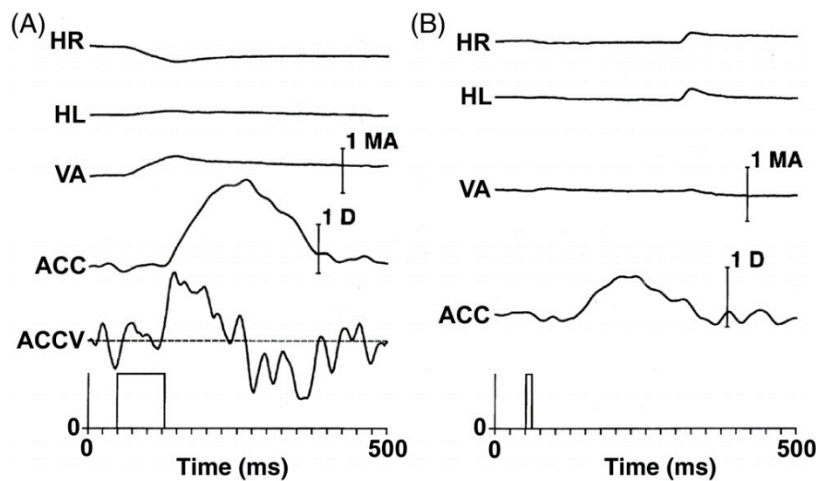


Trajet nerveux des branches sympathiques (fines lignes bleues) et parasympathiques (large tracé bleu) en direction des muscles ciliaires. C8 : vertèbre cervicale 8, T1 : vertèbre thoraciques 1, T2 : vertèbre thoracique 2. D'après Kauffman (1992), Accommodation and presbyopia. Neuromuscular and biophysical aspects. In Hart WM, Adler's physiology of the Eye, 9th edition. St Louis, MO : Mosby.

Les neurones du noyau d'Edinger-Westphal, et plus particulièrement les pré-ganglionnaires (EWpg, faisant office de complexe parasympathique du noyau oculomoteur), représentent de ce fait les structures principales intervenant dans la transmission du message nerveux jusqu'aux muscles ciliaires et responsables des variations positives d'accommodation (Kozicz et al., 2011). De nombreuses études réalisées en majorité sur des macaques rhésus ont montré que des micro-stimulations électriques appliquées sur ces neurones en particulier ont déclenché une réponse accommodative (Clarke et al., 1985 ; Crawford et al., 1989 ; Judge et Cumming, 1986 ; Ostrin et Glasser, 2005 et 2007), confirmant les résultats similaires retrouvés chez les chats (Ripps et al., 1961).

Gamlin et al. (1994) ont mesuré la réponse accommodative à l'aide d'un autoréfracteur en réponse à des micro-stimulations des neurones d'EWpg. Un temps de latence de 75ms a été retrouvé quelle que soit la durée de la stimulation (80ms ou 10ms). Malgré tout, la durée de stimulation a eu un effet sur l'amplitude accommodative déclenchée, celle-ci était plus importante à mesure que la stimulation était plus longue, et il est à noter qu'un mouvement de vergence a été enregistré ici encore dans le cas d'une stimulation plus longue comparée à une

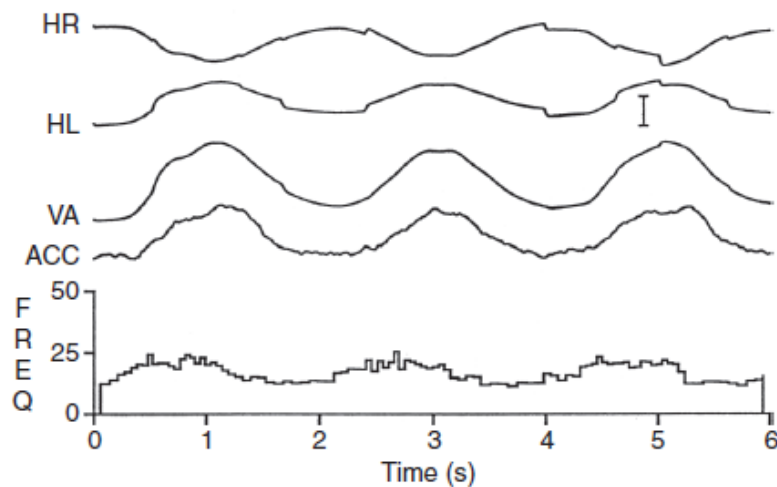
stimulation courte (80ms vs 10ms). La syncinésie accommodation/vergence sera abordée plus en détail ultérieurement.



Effet d'une micro-stimulation du noyau d'EW sur la réponse accommodative. La figure A montre une stimulation de 80ms (500Hz, 40µA) et nous constatons une variation positive de l'accommodation couplée à un mouvement de vergence marqué. La figure B montre une stimulation de 10ms (500Hz, 40µA) et nous constatons une variation d'accommodation de moindre amplitude qu'en A ainsi qu'une absence de réponse de vergence. HL : position horizontale de l'œil gauche ; RL : position horizontale de l'œil droit. D'après Gamlin et al., 1994.

En temps réel, des enregistrements réalisés sur ces mêmes neurones lors d'épreuves de poursuite d'une cible visuelle dans la profondeur sont venus confirmer les résultats précédents : l'activité des neurones isolés comme impliqués dans la réponse accommodative est augmentée lorsque la cible se rapproche, donc lorsqu'une amplitude d'accommodation plus importante est exigée pour maintenir la vision nette de la cible. Leur fréquence de décharge augmente de la même façon, avec une sensibilité enregistrée à 3.3(pic/seconde)/dioptrie d'accommodation (Gamlin et al., 1994). Concernant la latence de la réaction, il est à noter une phase d'avance non négligeable entre le pic de décharge et la réponse accommodative en elle-même, qui excède les 75ms retrouvé lors des expérimentations de micro-stimulation, lorsque qu'une cible se déplaçant dans la profondeur est fixée. Selon les auteurs, cette phase indique une sensibilité supplémentaire des neurones à la vitesse de déplacement de la cible, en d'autres termes à la vitesse de mise en jeu nécessaire à focaliser correctement sur la cible (ici, 1.2 (pics/s)/(dioptrie/s) pour fréquence de 0.5Hz). En comparaison de la réponse en vergence étudiée ultérieurement, la réponse accommodative dépend directement de l'action des muscles ciliaires réputée plus lente (Gamlin et al., 1994) et liée aux caractéristiques anatomiques de ces muscles ainsi qu'au mécanisme

d'accommodation périphérique. Ainsi, cette activité neuronale supplémentaire est présumément requise pour permettre une réponse accommodative adéquate.



Comportement d'un neurone EWpg pendant la fixation d'une cible mouvante de façon sinusoïdale dans la profondeur. La fréquence de décharge enregistrée pour une variation d'accommodation de 5δ est passée de 15 pics/s à 25 pics/s. HL : tracé de la position horizontale de l'œil gauche ; HR : tracé de la position horizontale de l'œil droit ; VA : angle de vergence exprimé en angle métrique ; ACC : réponse accommodative exprimée en dioptries. L'échelle représentée correspond à une valeur de 2 angles métriques et 2 dioptries d'accommodation. D'après Gamlin et al., 1994.

Si les neurones EWpg sont clairement identifiés désormais comme principaux acteurs de la réponse accommodative, les régions corticales qui leur sont associées, elles, le sont beaucoup moins, au même titre que pour les mouvements de vergence. En faisant le parallèle avec les circuits corticaux impliqués dans la réponse de vergence (Gamlin, 2002), il est cependant possible d'isoler des pistes concernant les aires corticales impliquées elles aussi dans les fluctuations d'accommodation.

A ce titre, il est important d'étudier les structures projetant directement ou indirectement vers les EWpg et présentées dans les travaux réalisés sur des macaques de Judge et Cumming (1986), Mays et Porter (1984), Mays et al. (1986) et Zhang et al. (1992). Certaines cellules de l'aire supra-oculomotrice (SOA) présentent en effet des implications dans le contrôle de la convergence, comme expliqué précédemment, alors que d'autres semblent plus être en lien avec le contrôle de l'accommodation. Conformément à ces considérations, Zhang et al. (1991) ont démontré que concernant la convergence, des neurones issus du SOA projetaient directement vers les motoneurones des muscles droits internes ipsilatéraux. Par analogie, il est

donc fort probable qu'un mécanisme similaire pour l'accommodation, mettant cette fois en jeu des neurones issus des noyaux d'EW, existe.

En addition à cela, des études portant sur des singes rhésus (May et al., 1992) ont permis de mettre au jour des liens entre le noyau d'EW et le noyau fastigial (cFN) et postérieur interposé (PIN) du cervelet : certains neurones du cFN seraient impliqués dans la réponse de vision de près, donc dans les mouvements de convergence et l'augmentation de l'accommodation (Gamlin et al., 1996), alors que certains neurones du PIN interviendraient dans la réponse de vision de loin (divergence et relâchement accommodatif ; Zhang et Gamlin, 1998). Des études supplémentaires réalisées sur des chats par électrostimulations des noyaux interposés du cervelet (Bando et al., 1978 ; Hosoba et al., 1978) ont montré ici encore que l'accommodation pouvait être modifiée par ce biais. Chez les primates comme chez les chats, le cervelet, qui présente des projections vers le noyau d'EW, est une structure supplémentaire pouvant moduler la réponse accommodative de la même façon que la réponse de vergence.

Une dernière structure, difficilement identifiée jusqu'à maintenant, interviendrait, elle aussi, dans la réponse en accommodation. Il s'agirait d'une région proche ou incluant celle du noyau de la commissure postérieure (Judge et Cumming, 1986 ; Mays et al., 1986) qui projetterait directement et de façon monosynaptique vers le noyau d'EW. Ces projections ont été étudiées et identifiées actuellement chez le pigeon (Gamlin et Reiner, 1991), et il est probable que, si cette espèce partage avec les macaques et l'Homme les mêmes caractéristiques sur ce point, le noyau de la commissure postérieure intervienne dans la réponse en vision de près, lorsque l'accommodation et l'angle de vergence doivent être augmentés, ainsi que dans le réflexe pupillaire de vision proche. Cependant, les recherches manquent encore à propos du rôle exact et des connexions existantes concernant cette dernière structure impliquée.

Dans un récent travail, Busetini et al. (2007) ont revu les mécanismes neuronaux de contrôle de l'accommodation et de la vergence ainsi que leurs interactions. Les régions corticales impliquées dans les réponses en accommodation sont difficilement dissociables de celles intervenant dans les réponses de vergence étant donné le cheminement du message nerveux vers le SOA et le noyau d'EW, et concernent de nouveau les régions temporales, frontales et le NRTP chez le macaque (Akao et al., 2005 ; Takemura et al., 2001 ; Gamlin et Yoon, 2000 ; Gamlin et Clarke, 1995), et le NRTP chez le chat (Hiraoka et Shimamura, 1989).

Les présentations des mécanismes et des bases neurales de l'accommodation et de la convergence montrent une synergie importante entre ces deux processus. Cependant, la pratique clinique et les modèles qui lui sont associés ont tendance à découpler ces deux réponses, afin d'isoler si un désordre est rencontré avec l'une et/ou avec l'autre. Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé ces modèles pour le diagnostic des dysfonctionnements de la vergence et/ou de l'accommodation. Nous allons par la suite présenter cette vision et ses nomenclatures.

CHAPITRE 4 : Modèle optométrique et approche clinique

Les fonctions d'accommodation et de vergence, de par leur synergie, focalisent l'essentiel des examens cliniques au niveau orthoptique et optométrique. Par la suite, nous allons présenter l'approche optométrique et son modèle fonctionnel, ainsi que les dysfonctionnements observables dans la pratique clinique. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur le cas de l'insuffisance de convergence, étant donné sa plus forte prévalence, en particulier chez les enfants et les jeunes adultes.

4.1. Modèle clinique des réponses de vergence et d'accommodation

La pratique clinique se focalise beaucoup sur l'évaluation de la vergence, et même si cette approche est restée statique avec les moyens de l'époque, deux modèles majoritaires sont toujours d'actualité pour décrire les différentes composantes de la réponse en vergence : celui de Maddox (1893) et celui de Fincham et Walton (1957). Le premier fait état d'une réponse en vergence modulée par la somme de 4 composantes : une tonique, une proximale, une accommodative et une fusionnelle. Le lien de syncinésie entre la réponse en vergence et celle en accommodation a poussé le second à présenter la réponse en vergence comme composante fondamentale de la réponse totale. Cependant, un modèle clinique plus récent (Schor et Ciuffreda, 1983) reprend ces deux dernières descriptions en combinant la majeure partie des idées avancées, en partie grâce aux recherches effectuées depuis.

La composante « fusionnelle » : les mouvements de vergence sont avant tout stimulés par la diplopie. Le fait de percevoir une cible en double indique qu'il y a présence d'une disparité entre les deux images rétiniennes en termes de position assez importante pour dépasser la taille des aires de Panum et que l'angle de vergence n'est pas adapté pour percevoir l'objet de façon simple. Il faut donc le modifier en conséquence : si la diplopie est croisée (l'œil droit perçoit l'image de gauche et vice-versa), c'est que le sujet fixe en arrière du point observé, il va donc devoir déclencher un mouvement de convergence. Si la diplopie est homonyme (l'œil droit perçoit l'image de droite et vice-versa), c'est que le sujet fixe en avant du point observé, il va donc devoir diverger pour voir simple. Cette composante « fusionnelle » décrite initialement par Maddox (1893) serait contrôlée par un mécanisme de vergence de disparité

qui va permettre de faire varier l'angle de vergence afin de faire en sorte que les lignes de regard se croisent sur l'objet fixé. En cela, ce mécanisme ne serait pas représenté par une unique entité physiologique : la convergence et la divergence sont ici à dissocier, du fait des différences existantes entre les cellules du tronc cérébral impliquées dans ces mouvements respectifs (Mays, 1984). Les cellules responsables des mouvements de convergence sont en effet bien supérieures en nombre aux cellules impliquées dans les mouvements de divergence, ce qui expliquerait par la même occasion que les réserves fusionnelles mesurées cliniquement soient de plus faible amplitude et plus lentes à être mises en jeu dans le cas de la divergence. De surcroît, la nature de la réponse en convergence et divergence fait apparaître une deuxième subdivision de leurs composantes qu'il est possible de distinguer par « grossière » et « fine » (Jones, 1983). Les vergences de disparité « grossières » sont activées par de larges disparités et pour de larges cibles, répondant à des stimuli quelle que soit leur différence de taille sur les deux rétines (aniséiconie ou iséiconie). Les vergences de disparité « fines » sont stimulées de façon optimale par de plus petites cibles, donc relatives à des détails plus fins, et de plus petites disparités, nécessitant de leur côté des images rétinienne de taille similaire (iséiconie). Ces deux composantes agissent de concert : le mouvement de vergence est d'abord initié par les plus larges disparités, requérant d'abord l'action de la part « grossière », puis complété et finalisé par la part « fine » pour une meilleure précision (Jones, 1980). Cette dernière permet par la même occasion le maintien d'un angle de vergence stable à la fin du mouvement, sa réponse étant alors modulée par un rétrocontrôle négatif utile à la précision du mouvement. Ce rétrocontrôle est un processus pour lequel la réponse motrice réduit elle-même le stimulus qui l'a créée. Ainsi, un mouvement de vergence stimulé par une diplopie engendrera en conséquence une réduction rapide de la disparité rétinienne responsable. Progressivement, la diplopie est de moins en moins ressentie jusqu'à être supprimée par l'alignement des axes visuels sur la cible. C'est l'analyse de cette diminution qui est à l'origine de ce rétrocontrôle, essentielle à une meilleure précision du mouvement et rendue possible par l'intermédiaire du mécanisme de vergence de disparité « fine ». On peut donc parler de mouvement établi « à boucle fermée » concernant les vergences, bien différent de la nature des saccades étant donné la possibilité d'ajustement du mouvement en temps réel. La composante fusionnelle représenterait la réponse majoritaire dans un mouvement de vergence (Howard et Rodgers, 2002). Il est possible cliniquement d'apprécier l'amplitude de sa part dans la réponse statique de vergence grâce à la mesure des phories, positions de « repos physiologique » des axes visuels en l'absence de stimulus fusionnel, donc quand la fusion est rendue impossible par l'utilisation d'un dissociateur.

La composante « accommodative » : la réponse en convergence est aussi influencée par les fluctuations d'accommodation. Le moyen le plus simple de s'en rendre compte consiste à modifier la réponse accommodative à l'aide de verres sphériques et d'observer si les phories, positions de repos physiologique des axes visuels, elles aussi ont évolué. Une variation positive de l'accommodation, en utilisant des verres négatifs par exemple, entraîne une diminution des mesures d'exophorie et une augmentation des mesures d'ésophorie, donc un couple oculaire présentant un angle de vergence plus important. De façon identique, une diminution de l'accommodation entraîne cette fois une diminution de la part de convergence accommodative mise en jeu. Ce lien de syncinésie est caractérisé par le rapport AC/A , qui représente la part de convergence accommodative déclenchée (exprimée en dioptrie prismatique en général, Δ) par dioptrie d'accommodation mise en jeu (δ). Ce rapport permet ainsi de quantifier l'impact de la convergence accommodative sur la réponse totale en vergence, mais est cependant variable en fonction des individus. Par exemple, chez des individus normaux, il est fait état de valeurs allant de $1\Delta/\delta$ à $7\Delta/\delta$ (Ogle et al., 1967), la moyenne statistique étant estimée à $3.5\Delta/\delta$. Plusieurs autres études (Eadie et Carlin, 1995 ; Ciuffreda et al., 1983) ont eux aussi montré l'existence de ce lien accommodation/convergence à l'aide de mesures objectives des mouvements oculaires pendant des fluctuations accommodatives et quand un œil était caché. Cliniquement, il existe plusieurs méthodes différentes pour le mesurer, mais il est à noter avant tout que cette commande de vergence est stimulée par une réponse du réflexe d'accommodation, donc en relation directe avec un effort accommodatif dans la volonté de récupérer une image nette. Son rôle est donc majoritairement de coupler son action à celle du mécanisme de vergence de disparité, et elle représenterait la deuxième part la plus importante dans un mouvement de vergence (Cumming et Judge, 1986).

La composante « tonique » : en l'absence de toute innervation musculaire, les yeux se positionneraient dans un état de « repos anatomique », en grand décalage en divergence, du fait du positionnement des orbites (approximativement 17Δ de décalage vers l'extérieur à partir de la position « droit devant », Von Noorden, 1985). Le modèle de Maddox prend en compte une composante de vergence permettant aux axes visuels de passer de la position de repos anatomique à la position de repos physiologique (entre 3 et 5Δ de décalage vers l'intérieur à partir de la position « droit devant », Ciuffreda et Tannen, 1995). Cette part ne fluctue que très peu et est en général stable dans le temps. Elle est directement liée à l'état

d'éveil de l'individu et n'est par contre pas influencée par les autres composantes ni par d'autres innervations. Cependant, il est nécessaire de la prendre en compte dans la réponse totale en vergence. Si son action était nulle, le système de vergence de disparité ne serait sûrement pas assez performant pour pallier le décalage de la position de repos anatomique.

La composante « proximale » : elle a pour origine la conscience que le sujet a de la distance à laquelle sa cible est placée. La composante proximale vient typiquement de l'analyse des indices stéréoscopiques, de recouvrement et de taille relative des objets permettant d'évaluer les distances et la profondeur entre les différentes cibles du champ visuel. Même si sa part dans la réponse statique totale de vergence ne reste que très faible (Hung et al., 1996 ; Schor et al., 1992), son action va permettre cependant de faciliter l'initiation de larges variations d'angle de vergence, comme passer d'une cible à une distance très lointaine à une cible très proche (Joubert et Bedell, 1990 ; Schor et al., 1992), ou de poursuivre avec plus de précision une cible se déplaçant dans la profondeur (Cormack et al., 1989 ; Erkelens et Regan, 1986). Ce signal de proximité est aussi responsable d'une partie de la réponse en accommodation et de la constriction de l'iris (triade de vision proche ou *near triad*). En général très peu mesurée en clinique, la composante proximale est par exemple responsable du phénomène d'accommodation et de convergence instrumentale, et son action se fait indépendamment des autres réponses intervenant dans les mouvements de vergence. Sa part dans la réponse totale de vergence est exprimée par le ratio PC/A, qui prend en compte la proximité de la cible mais exprimé en demande dioptrique plutôt qu'en mesure distale.

Le modèle clinique décrivant les différentes composantes de l'accommodation est similaire dans son mécanisme à celui présenté pour la vergence. Ce modèle statique toujours utilisé en clinique prend lui aussi en compte 4 grandes composantes pour décrire la réponse accommodative globale :

La composante « réflexe » : aussi appelée accommodation réflexe, elle représente l'ajustement automatique de l'état réfractif de l'œil pour obtenir et maintenir une image rétinienne nette et focalisée en réponse à un flou. On peut donc qualifier cette composante de « rapide », car c'est elle qui permettrait la focalisation immédiate. Malgré tout, elle n'entre en compte que pour de faibles valeurs de focalisation, c'est-à-dire quand l'accommodation nécessaire à mettre en jeu n'excède pas $2,00\delta$ (Fincham, 1951). Pour une défocalisation plus importante, il s'est avéré qu'une composante volontaire est alors nécessaire pour ramener une perception nette de la cible (Ciuffreda et Kruger, 1988). Sachant cependant que les distances

majoritaires de travail des individus se situent entre plus de 5m (∞) et 40cm, on peut donc supposer que cette composante est la réponse rapide majoritaire de l'organisme pour une vision nette et stable à toute distance. L'accommodation réflexe reste probablement la plus importante des composantes de l'accommodation en condition monoculaire comme en condition binoculaire (Hung, Ciuffreda et Rosenfield, 1996). Son fonctionnement est similaire à celui du mécanisme de vergence de disparité concernant les mouvements de vergence : il existe ici encore une boucle de rétrocontrôle où la réponse motrice va elle-même réduire progressivement le stimulus qui l'a créé en temps réel. L'accommodation réflexe étant stimulée par un flou, la variation d'accommodation engendrée en conséquence va progressivement diminuer ce flou jusqu'à l'obtention de la perception nette de la cible. Ainsi, il a été montré que le mécanisme d'accommodation réflexe fonctionne en boucle fermée et permet une meilleure précision et un meilleur contrôle de la réponse.

La composante « de convergence » : la syncinésie accommodation/convergence fonctionne comme son nom l'indique dans les deux sens, et les mouvements de vergence vont aussi influencer sur la réponse accommodative (Fincham et Walton, 1957). En effet, si les variations d'accommodation ont un impact sur la réponse de vergence, la réciprocité existe aussi. La stimulation de la convergence entraîne donc indubitablement une réponse accommodative (accommodation de convergence, caractérisée cette fois par le rapport CA/C en clinique), et représenterait une part de l'ordre de $0,4\delta$ /angle métrique de convergence chez les jeunes adultes (Rosenfield et Gilmartin, 1988). L'accommodation de convergence représente la deuxième plus importante des composantes de la réponse totale en accommodation. Nous reviendrons plus en détails sur le fonctionnement couplé de l'accommodation et de la convergence par la suite, étant donné l'implication directe de ces deux fonctions dans la qualité du signal visuel, tant du point de vue de la netteté que de celui de la simplicité de l'image.

La composante « proximale » : au même titre que pour la vergence, une part de la réponse accommodative est d'origine proximale, elle provient directement de la conscience que l'individu a de la proximité de la cible qu'il observe. En général, son influence n'opère qu'à une distance inférieure à 3 mètres (Hokoda et Ciuffreda, 1983), et reste faible, puisqu'elle ne représente que 4% (pouvant aller jusqu'à 10% au maximum) de la réponse totale en accommodation dans des conditions de fusion normale (Hung, Ciuffreda et Rosenfield, 1996).

Cette part de l'accommodation n'est pas engendrée par un flou, mais plutôt par des indices perceptuels de distance et de relief, de façon identique au mouvement de vergence.

La composante « tonique » : l'accommodation tonique se retrouve en l'absence de stimuli, qu'il s'agisse de défocalisation d'image (flou), de disparité (vision double) ou encore d'indices de proximité de la cible. La façon la plus précise de mesurer cette part reste de placer l'individu au centre d'une pièce complètement obscure et d'apprécier l'état réfractif de l'œil à l'aide d'outils indétectables pour l'œil (autoréfractomètre à infrarouge par exemple). On découvre dès lors chez les jeunes adultes un état réfractif qui évolue, et une accommodation tonique d'une valeur de $1,00\delta \pm 1$ (Post, Johnson, Tsuetaki, 1984).

4.2. Synergie accommodation/convergence

Les différentes composantes des réponses en accommodation et en vergence du modèle optométrique de Maddox présenté précédemment font état d'une action majoritaire de deux d'entre elles :

- La composante « réflexe » (entraînée en réponse à un flou) et la composante issue de la réponse en convergence (CA/C) pour l'accommodation.
- La composante issue du mécanisme de vergence de disparité (entraînée en réponse à une diplopie) et la composante issue de l'accommodation (AC/A) pour la vergence.

Les composantes toniques et proximales ne représentant qu'une part faible de la réponse nécessaire à l'obtention de la simplicité et de la netteté de la scène visuelle, le lien entre l'accommodation et la convergence est donc d'une importance cruciale en vision proche ici : la réponse accommodative et la réponse de vergence sont toutes deux couplées pour améliorer mutuellement leur efficacité (Schor , 1983), les systèmes de vergence de disparité et d'accommodation réflexe voient leur action soulagée respectivement par l'innervation de convergence accommodative et d'accommodation de convergence, lien de syncinésie décrit précédemment.

Si l'addition de ces 4 composantes permet une réponse accommodative et de vergence appropriée, ce modèle est cependant qualifié dans la littérature comme décrivant la « réponse rapide » du système. Lorsqu'une variation importante d'accommodation et de vergence est nécessaire, comme par exemple pour passer de la vision lointaine à la distance proche de lecture, le système tel qu'il a été décrit se met en place pour permettre une perception simple et nette de la nouvelle cible. Concernant la réponse accommodative globale comme la réponse

de vergence, elles sont décrites « à boucle fermée ». Cela signifie qu'une fois la bonne amplitude atteinte, la réponse motrice réduit elle-même le stimulus qui l'a créée de façon à stopper toute variation supplémentaire et maintenir la réponse en l'état, afin de conserver la netteté et la simplicité de la cible. Le mouvement est modulé en temps réel grâce à cette rétroaction et ce système en boucle fermée.

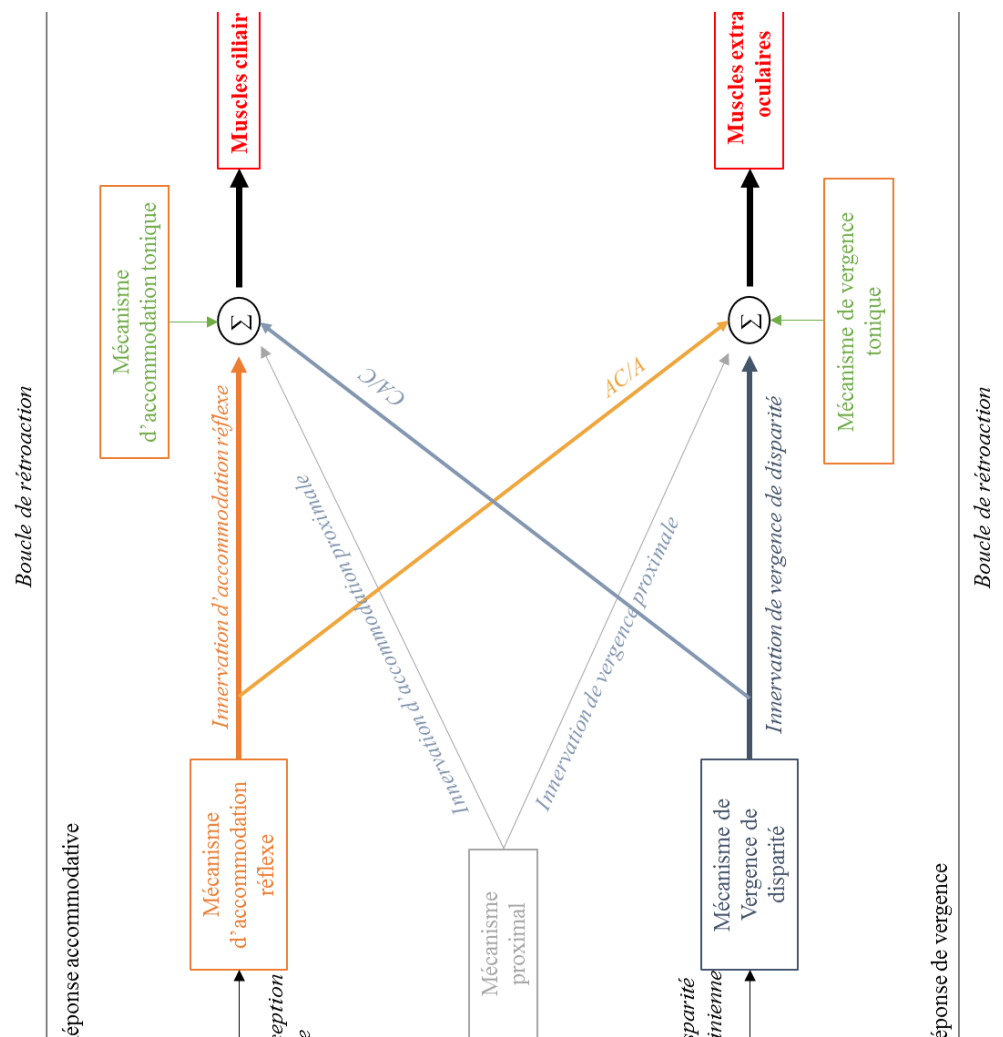


Schéma représentatif (p.66) de la réponse en convergence et en accommodation. Le mécanisme d'accommodation réflexe est représenté en orange et est stimulé par une perception floue de la cible. Son activité est directe vers les muscles ciliaires, mais une part de cette réponse nerveuse est aussi envoyée aux muscles extra-oculaires par l'intermédiaire de la convergence accommodative (AC/A). De façon similaire, le mécanisme de vergence de disparité, ici représenté en bleu, est stimulé par une diplopie. Son activité permet en grande partie de supprimer celle-ci, mais une part de cette réponse est aussi envoyée aux muscles ciliaires sous la forme de l'accommodation de convergence (CA/A). Ces deux mécanismes et le lien de syncinésie qui les associe permettent la majorité de la réponse en vergence et en accommodation. La part tonique, représentée en vert, ainsi que la composante proximale, représentée en gris, sont utiles dans la réponse mais cependant beaucoup moins importante en termes d'amplitude. Une boucle de rétroaction est représentée pour chacune des réponses, montrant que la réponse en accommodation et en vergence entraînée par la distance à laquelle est la cible module directement l'activité des mécanismes impliqués une fois la bonne amplitude atteinte. Adapté de Benjamin et al., 2006.

4.3. Dysfonctionnements A-V

Les réponses en accommodation et convergence sont susceptibles de présenter des dysfonctionnements, conduisant une perte transitoire de la qualité de la vision sensorielle (vision floue et/ou double) et/ou à des symptômes visuels caractéristiques (yeux douloureux, maux de tête...). Les classifications établies après plusieurs décennies font état d'une part non négligeable de problèmes existants pour une des deux, voir les deux réponses, chez les individus non-presbytes. Le modèle optométrique dissocie cependant la réponse de vergence de la réponse accommodative pour les analyser une à une, afin d'isoler lequel des deux systèmes est défaillant, en dépit du fait que ces deux réponses sont extrêmement liées. La syncinésie accommodation/convergence étant régulièrement sollicitée pour palier une carence dans l'un des deux domaines, un désordre non pris en charge risque souvent de provoquer, à terme, un bouleversement dans l'équilibre des composantes intervenant dans chacune des réponses. Si l'acuité visuelle n'est que rarement impactée et que ces désordres mineurs, car présentant un impact limité sur la perception du relief en comparaison d'une amblyopie, de certains strabismes ou de paralysies accommodatives, n'ont que très peu de lien avec l'amétropie (le défaut visuel type myopie, hypermétropie ou astigmatisme), les symptômes qu'ils provoquent ont longuement été référencés et des plaintes caractéristiques ont permis de mieux pouvoir les dépister.

4.3.1. Symptomatologie

Une analyse précise des symptômes, très souvent visuels mais parfois secondaires, a été réalisée depuis plusieurs décennies par les différents cliniciens impliqués dans le dépistage de ces dysfonctionnements, en particulier les ophtalmologistes, les orthoptistes et les optométristes. En s'appuyant sur des échelles étalonnées type Convergence Insufficiency Symptom Survey (CISS, Rouse et al., 2009) ou COVD-QOL (Maples, 2002), il est possible au sujet de subjectivement chiffrer sa symptomatologie et ainsi d'en apprécier l'intensité chez lui. A partir d'un certain score, fonction de l'échelle utilisée, la présence d'un trouble visuel est fortement suspectée chez le sujet, ce qui nous permet de considérer si ce trouble est symptomatique chez lui. Ces échelles ont avant tout été conçues pour le dépistage des troubles de la vergence et les problèmes rencontrés en vision proche. Certains désordres, comme l'insuffisance de convergence (IC), plus fréquemment rencontrés (Cooper et Jamal, 2012), provoquent des plaintes caractéristiques chez les individus touchés, comme maux de tête, signes de fatigue visuelle de type « globes oculaires douloureux », inconforts, vision floue

transitoire, vision double occasionnelle, problèmes de concentration et de mémorisation en lecture, perte de fluidité dans le passage de la vision proche à la vision lointaine, perturbations susceptibles d'handicaper le sujet pendant ses activités.

D'un point de vue accommodatif, quand la demande en dioptrie égale ou excède la moitié de l'amplitude maximale de l'accommodation de l'individu, nous devons nous attendre à une succession de symptômes handicapants pour le sujet lors d'une stimulation prolongée (Grosvenor, 2007), comme par exemple une vision fluctuante et instable, des possibles maux de têtes, des signes de fatigue visuelle (yeux rouges ou douloureux), des modifications dans la posture de travail (allongement de la distance de travail...), parfois associés à des troubles de vision binoculaire (Duane, 1925 ; Berens et al., 1932 ; Daum KM., 1983 ; Sterner et al., 2006 ; Borsting et al., 2003). On retrouve par exemple le plus souvent cette condition lors de la presbytie débutante, à partir de 40 ans et après (Millodot et al., 1989). Les distances de travail et de lecture sont en général de l'ordre de 40cm, or cela représente une demande théorique en accommodation de 2,5δ, qui correspond approximativement, à la moitié de l'amplitude maximale d'accommodation disponible à cet âge précisément. Toutefois, certains cas d'insuffisance d'accommodation ou de difficultés à mettre en jeu ce biomécanisme font cependant expérimenter ce genre de plaintes même chez des individus plus jeunes (Borsting et al., 2003 ; Sterner et al., 2006). La pratique clinique en ophtalmologie et en optométrie a permis de distinguer les différents dysfonctionnements mineurs rencontrés de façon usuelle et provoquant les symptômes détaillés plus haut. Plusieurs classifications ont donc été mises en place afin d'isoler certains types de difficultés rencontrées par les individus non-presbytes. Afin de présenter les différents désordres rencontrés concernant les fonctions de vergence et accommodative, nous nous appuyerons sur les classifications réalisées par Scheiman et Wick (2014), très utilisées aujourd'hui en clinique, ainsi que sur les travaux de Cooper et Jamal (2012), de Duke-Elder (1949) et de Daum (1983).

4.3.2. Dysfonctionnements de la vergence

La littérature que nous avons majoritairement employée a classifié les désordres de la vergence en relation directe avec la force du lien accommodation/convergence observée lors des tests cliniques réalisés. En fonction des déséquilibres, les symptômes peuvent se retrouver davantage à distance lointaine ou à distance proche, et la prise en charge n'est donc pas toujours la même, bien que le mécanisme soit similaire.

Dysfonctionnements en relation avec un fort lien AC/A

Un lien AC/A fort entraîne irrémédiablement une forte fluctuation de l'amplitude des phories dès que l'accommodation varie. C'est à cause de ce déséquilibre et de cette sensibilité accrue aux variations d'accommodation que le positionnement statique des phories risque de provoquer un désordre dans le maintien de l'angle de vergence à certaines distances.

Dysfonctionnement	Symptômes relayés	Signes cliniques
Excès de convergence (Relatif à une distance proche)	<ul style="list-style-type: none"> - Majoritairement en vision proche - Signes de fatigue visuelle et maux de tête associés - Vision floue intermittente - Vision double intermittente - Symptômes accentués en fin de journée - Difficultés de concentration et de mémorisation en lecture - Sensation d'endormissement en lecture - Lecture rapportée comme lente 	<ul style="list-style-type: none"> - Esophorie plus importante en vision proche qu'en vision lointaine - Réserves fusionnelles en divergence diminuées, critères de confort non respectés - Fort lien AC/A calculé et mesuré - Flexibilité accommodative binoculaire altérée lorsqu'il faut mettre en jeu l'accommodation - Positionnement accommodatif lointain en arrière de la cible - Disparité de fixation en vision proche de type ésophore - Flexibilité de vergence altérée lorsqu'il faut mettre en jeu de la divergence
Excès de divergence (Relatif à une distance lointaine)	<ul style="list-style-type: none"> - Vision double intermittente en vision lointaine - Signes de fatigue visuelle occasionnels en vision proche 	<ul style="list-style-type: none"> - Exophorie en vision lointaine de plus grande amplitude qu'en vision proche - Réserves fusionnelles en convergence diminuée en vision lointaine, critères de confort non respectés - Fort lien AC/A calculé et mesuré - Flexibilité de vergence altérée lorsqu'il faut mettre en jeu de la convergence en vision lointaine

Classification, symptômes associés et signes cliniques des dysfonctionnements de la vergence associés à un fort lien AC/A, adapté de Scheiman et Wick (2014).

Dysfonctionnements en relation avec un faible lien AC/A

Un lien AC/A faible provoque un dysfonctionnement particulier, car la syncinésie accommodation/convergence est lourdement altérée. En vision proche par exemple, l'exophorie a tendance à fortement augmenter, entraînant une sollicitation importante des réserves fusionnelles en convergence, qui parfois ne sont pas suffisantes.

Dysfonctionnement	Symptômes relayés	Signes cliniques
Insuffisance de convergence (Relatif à une distance proche)	<ul style="list-style-type: none"> - Majoritairement en vision proche - Signes de fatigue visuelle et maux de tête associés - Vision floue intermittente - Vision double intermittente - Symptômes accentués en fin de journée - Difficultés de concentration et de mémorisation en lecture - Sensation d'endormissement en lecture - Lecture rapportée comme lente 	<ul style="list-style-type: none"> - Exophorie plus importante en vision proche qu'en vision lointaine - Réserves fusionnelles en convergence diminuées en vision proche, critères de confort non respectés - Punctum Proximum de Convergence éloigné - Faible lien AC/A calculé et mesuré - Flexibilité accommodative binoculaire altérée lorsqu'il faut relâcher l'accommodation - Positionnement accommodatif en avant de la cible - Disparité de fixation en vision proche de type exophore - Flexibilité de vergence altérée lorsqu'il faut mettre en jeu de la convergence
Insuffisance de divergence (Relatif à une distance lointaine)	<ul style="list-style-type: none"> - Vision double et/ou floue intermittente en vision lointaine - Signes de fatigue visuelle occasionnels en vision lointaine - Symptômes accentués en fin de journée 	<ul style="list-style-type: none"> - Esophorie en vision lointaine de plus grande amplitude qu'en vision proche - Réserves fusionnelles en divergence diminuée en vision lointaine, critères de confort non respectés - Faible lien AC/A calculé et mesuré - Flexibilité de vergence altérée lorsqu'il faut mettre en jeu de la divergence en vision lointaine

Classification, symptômes associés et signes cliniques des dysfonctionnements de la vergence associés à un faible lien AC/A, adapté de Scheiman et Wick (2014).

Dysfonctionnements en relation avec un lien AC/A normal

Ce type de dysfonctionnements est directement en relation avec le positionnement des phories en vision lointaine, donc lié à l'action de la composante tonique de vergence, mais aussi en relation avec l'étendue des réserves fusionnelles du sujet ou encore lié à un problème vertical.

Dysfonctionnement	Symptômes relayés	Signes cliniques
Exophorie basique	<ul style="list-style-type: none"> - Vision double et/ou floue intermittente en vision lointaine et/ou proche - Signes de fatigue visuelle occasionnels en vision lointaine et/ou proche - Symptômes accentués en fin de journée 	<ul style="list-style-type: none"> - Exophorie similaire en vision lointaine et en vision proche - Réserves fusionnelles en convergence diminuées en vision lointaine et/ou vision proche, critères de confort non respectés - Flexibilité accommodative binoculaire altérée lorsqu'il faut relâcher l'accommodation - Positionnement accommodatif en avant de la cible - Disparité de fixation en vision lointaine et/ou proche de type exophore - Flexibilité de vergence altérée lorsqu'il faut mettre en jeu de la convergence
Esophorie basique	<ul style="list-style-type: none"> - Vision double et/ou floue intermittente en vision lointaine et/ou proche - Signes de fatigue visuelle occasionnels en vision lointaine et/ou proche - Symptômes accentués en fin de journée 	<ul style="list-style-type: none"> - Esophorie similaire en vision lointaine et en vision proche - Réserves fusionnelles en divergence diminuées en vision lointaine et/ou vision proche, critères de confort non respectés - Flexibilité accommodative binoculaire altérée lorsqu'il faut mettre en jeu l'accommodation - Positionnement accommodatif lointain en arrière de la cible - Disparité de fixation en vision lointaine et/ou proche de type esophore - Flexibilité de vergence altérée lorsqu'il faut mettre en jeu de la divergence

Dysfonctionnement	Symptômes relayés	Signes cliniques
Dysfonctionnement des vergences fusionnelles	<ul style="list-style-type: none"> - Vision double et/ou floue intermittente en vision lointaine et/ou proche - Signes de fatigue visuelle occasionnels en vision lointaine et/ou proche - Symptômes accentués en fin de journée - Difficultés de concentration et de mémorisation en lecture - Sensation d'endormissement en lecture - Lecture rapportée comme lente 	<ul style="list-style-type: none"> - Phories de faible amplitude, en vision lointaine comme en vision proche - Réserves fusionnelles en convergence et divergence diminuées en vision lointaine et/ou vision proche - Flexibilités accommodative binoculaire altérées lorsqu'il faut mettre en jeu et relâcher l'accommodation - Flexibilité de vergence altérée lorsqu'il faut mettre en jeu de la convergence et de la divergence
Problème vertical	<ul style="list-style-type: none"> - Vision double et/ou floue intermittente en vision lointaine et/ou proche - Signes de fatigue visuelle occasionnels en vision lointaine et/ou proche - Symptômes accentués en fin de journée - Mal des transports - Difficultés de concentration et de mémorisation en lecture 	<ul style="list-style-type: none"> - Hyperphorie - Réserves fusionnelles en convergence et divergence diminuées en vision lointaine et/ou vision proche - Réserves fusionnelles verticales non symétriques et parfois anormalement larges - Flexibilité de vergence altérée lorsqu'il faut mettre en jeu de la convergence et de la divergence

Classification, symptômes associés et signes cliniques des dysfonctionnements de la vergence associés à un lien AC/A normal (p69-70), adapté de Scheiman et Wick (2014).

4.3.3. Dysfonctionnements de l'accommodation

Les dysfonctionnements accommodatifs concernent soit un problème de mise en jeu soit un problème de relâchement de l'accommodation. Son fonctionnement est donc altéré et ces troubles engendrés doivent aussi être mis en lien avec l'âge de la personne, sachant qu'ici nous ne parlons pas de presbytie. Les désordres rencontrés font état d'une flexibilité accommodative ou d'une amplitude maximale d'accommodation diminuée.

Dysfonctionnement	Symptômes relayés	Signes cliniques
Insuffisance accommodative (Difficulté de mise en jeu)	<ul style="list-style-type: none"> - Majoritairement en vision proche - Inconfort, douleurs, fatigue relayée - Vision floue intermittente - Difficultés de concentration - Distance de travail souvent allongée 	<ul style="list-style-type: none"> - Amplitude d'accommodation inférieure à celle attendue pour l'âge - Flexibilité accommodative altérée quand il faut mettre en jeu de l'accommodation - Positionnement accommodatif lointain en arrière de la cible
Fatigue accommodative (Difficulté de mise en jeu)	<ul style="list-style-type: none"> - Majoritairement en vision proche - Inconfort, douleurs, fatigue relayée - Vision floue intermittente - Difficultés de concentration 	<ul style="list-style-type: none"> - Amplitude d'accommodation normale à celle attendue pour l'âge, mais ayant tendance à diminuer au fur et à mesure du testing - Flexibilité accommodative altérée quand il faut mettre en jeu de l'accommodation - Positionnement accommodatif lointain en arrière de la cible
Excès accommodatif (Difficulté de relâchement)	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté à passer rapidement de la vision proche à la vision lointaine - Inconfort, douleurs et fatigue ressentie en vision proche 	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité accommodative altérée quand il faut relâcher de l'accommodation - Positionnement accommodatif en avant de la cible
Inertie accommodative (Perte de flexibilité globale)	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté à passer rapidement de la vision proche à la vision lointaine et vice-versa. - Vision floue intermittente en vision proche - Inconfort, douleurs et fatigue ressentie en vision proche 	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité accommodative altérée quand il faut relâcher et mettre en jeu de l'accommodation

Classification, symptômes associés et signes cliniques des dysfonctionnements accommodatifs, adapté de Scheiman et Wick (2014)

4.4. Prévalence des dysfonctionnements A-V

Une première question se pose concernant l'impact que des dysfonctionnements de l'accommodation et/ou de la vergence peut avoir sur le fonctionnement cognitif lors de tâches qui sollicitent en grande partie le système visuel, comme par exemple la lecture et son apprentissage. Dans le cadre de notre travail, nous n'aborderons cependant pas les déficits engendrés par des amétropies (myopie, hypermétropie, astigmatisme) non ou mal corrigées, qui auraient un impact direct sur l'acuité visuelle, et de ce fait peuvent avoir une incidence négative sur les performances cognitives (Atkinson et al., 2002), les performances en lecture (Quaid et Simpson, 2013 ; Simons et al., 1988 ; Eames, 1955), ou plus largement, les performances scolaires (Rosner et al., 1997 ; Stewart-Brown et al., 1985). Ces études ont été en général réalisées sur des populations de jeunes enfants ou d'adolescents et traitent majoritairement de l'impact d'une mauvaise acuité engendrée par un défaut réfractif, donc d'un sens visuel détérioré (vision floue) du fait de la défocalisation des images par rapport à la rétine, sur les performances scolaires des sujets étudiés. Il est important de signaler que l'hypermétropie est une des rares amétropies qui peut passer inaperçue chez les sujets jeunes. En effet, l'œil étant trop court pour sa puissance, les images se focalisent généralement en arrière de la rétine, mais le processus d'accommodation peut et sera très souvent déclenché en réaction au flou engendré : les acuités des sujets hypermétropes non corrigés seront par conséquent très souvent dans les normales, excepté pour les fortes amétropies. Il est dès lors difficile de savoir si cet effort accommodatif supplémentaire aura un impact sur la performance en lecture. Les résultats de Rosner et al. (1997) tendent à montrer cependant que les hypermétropes non corrigés présentent souvent des aptitudes diminuées en lecture. Une demande accommodative plus élevée que la valeur normale requise est possiblement à l'origine de ce dysfonctionnement, sans que la vision sensorielle soit dégradée. Nous nous sommes donc concentrés exclusivement sur les dysfonctionnements d'ordre accommodatif et/ou de vergence, qui sont eux un peu plus complexes à dépister car n'ayant que peu d'impact sur l'acuité visuelle.

La population que nous avons décidé d'étudier dans nos travaux est celle qui présente des désordres d'accommodation et/ou de vergence dits « mineurs ». En effet, il s'agit des sujets jeunes non presbytes et non strabiques, chez qui la vision binoculaire est présente avec un degré évolué de perception du relief binoculaire. Les dysfonctionnements de vergence et

d'accommodation précédemment décrits, nous résumerons au travers des études bibliographiques sur la prévalence de ces troubles, plus particulièrement chez les enfants et jeunes adultes. Cacho-Martinez et al. (2010) et Cooper et Jamal (2012) rappellent que si les nomenclatures utilisées pour désigner ces troubles sont très souvent similaires, les valeurs diagnostiques à certains tests cliniques ne sont cependant pas toujours les mêmes, ainsi que le nombre de signes cliniques nécessaires au diagnostic en lui-même, allant parfois de 1 à 5 en fonction des études et pour certains types de dysfonctionnements seulement. De plus, la majorité des données statistiques de leur étude provient de populations ayant consulté un ophtalmologiste ou un optométriste, ou d'études réalisées directement dans des écoles ou universités, sans parfois de motivation de consultation. Il faut donc relativiser ces résultats, étant donné tous ces facteurs de variabilité, même si cette étude statistique permet tout de même de constater une plus grande prévalence générale de dysfonctionnements particuliers. Nous avons donc pris en compte plusieurs études récentes (Cacho-Martinez et al., 2010 ; Paniccia et Ayala, 2015 ; Montés-Micó, 2001 ; García-Muñoz et al., 2016) concernant la prévalence, et avons combiné les résultats dans les tableaux suivants.

Dans cette thèse, nous avons opté pour utiliser les mêmes nomenclatures ainsi que des méthodes de mesures cliniques et de classification similaires à celles de Scheimann et Wick (2014), mais aussi celles de Duke-Elder (1989), Daum (1983) et Cooper et al. (2012). Les tableaux ci-après résument la fréquence des dysfonctionnements retrouvés ainsi que le nombre de signes cliniques utilisés pour réaliser les différents diagnostics.

Prévalence générale des dysfonctionnements de la vergence

	Dysfonctionnement	Prévalence	Prévalence par étude	Tranche d'âge	Origine de la population	Nombre de signes cliniques requis	Auteurs
Désordres de la vergence	Insuffisance de convergence	2,25% - 33%	2,3%	Enfants	Ecole	2	Letourneau et al., 1988
			4,6%	Enfants	Clinique	4	Scheiman et al., 1996
			13,0%	Enfants	Ecole	2	Rouse et al., 1999
			17,3%	Enfants	Ecole	2	Borsting et al., 2003
			17,6%	Enfants	Clinique	2	Rouse et al., 1998
			18,3%	Enfants	NR	1	Abdi et al., 2005
			33,0%	Enfants	Clinique	NR	Dwyer, 1992
			12,6%	Enfants/JA	Clinique	5	Paniccia et Ayala, 2015
			3,5%	Adultes	Clinique	5	Lara et al., 2001
			5,7%	Adultes	Université	3	Garcia-Munoz et al., 2016
			5,9%	Adultes	Clinique	5	Montés-Mico, 2001
			7,7%	Adultes	Université	4	Porcar et Martinez-Palomera, 1997
	14,0%	Adultes	Clinique	1	Pickwell et al., 1986		
	Excès de convergence	1,5% - 15%	7,1%	Enfants	Clinique	NR	Scheiman et al., 1996
			15,0%	Enfants	Clinique	NR	Dwyer, 1992
			9,1%	Enfants/JA	Clinique	3	Paniccia et Ayala, 2015
			1,5%	Adultes	Université	3	Porcar et Martinez-Palomera, 1997
1,5%			Adultes	Clinique	4	Montés-Mico, 2001	

Prévalence générale des dysfonctionnements de la vergence

	Dysfonctionnement	Prévalence	Prévalence par étude	Tranche d'âge	Origine de la population	Nombre de signes cliniques requis	Auteurs
Désordres de la vergence	Insuffisance de divergence	0,1% - 2,7%	0,1%	Enfants	Clinique	NR	Scheiman et al., 1996
			0,7%	Enfants	Clinique	NR	Dwyer, 1992
			2,7%	Enfants/JA	Clinique	4	Paniccia et Ayala, 2015
			2,1%	Adultes	Clinique	4	Montés-Mico, 2001
	Excès de divergence	0,8% - 2,3%	0,8%	Enfants	Clinique	NR	Scheiman et al., 1996
			1,3%	Enfants/JA	Clinique	4	Paniccia et Ayala, 2015
			0,6%	Adultes	Université	3	Garcia-Munoz et al., 2016
			2,3%	Adultes	Clinique	4	Montés-Mico, 2001
	Exophorie basique	0,3% - 5,2%	0,3%	Enfants	Clinique	NR	Scheiman et al., 1996
			3,5%	Enfants/JA	Clinique	3	Paniccia et Ayala, 2015
			0,4%	Adultes	Clinique	4	Lara et al., 2001
			3,1%	Adultes	Université	3	Porcar et Martinez-Palomera, 1997
			0,6%	Adultes	Université	3	Garcia-Munoz et al., 2016
			5,2%	Adultes	Clinique	3	Montés-Mico, 2001

Prévalence générale des dysfonctionnements de la vergence

	Dysfonctionnement	Prévalence	Prévalence par étude	Tranche d'âge	Origine de la population	Nombre de signes cliniques requis	Auteurs
Désordres de la vergence	Esophorie basique	0,6% - 9%	0,6%	Enfants	Clinique	NR	Scheiman et al., 1996
			9,0%	Enfants	Clinique	NR	Dwyer, 1992
			5,1%	Enfants/JA	Clinique	3	Paniccia et Ayala, 2015
			1,5%	Adultes	Université	3	Porcar et Martinez-Palomera, 1997
			1,1%	Adultes	Université	3	Garcia-Munoz et al., 2016
			3,0%	Adultes	Clinique	3	Montés-Mico, 2001
	Dysfonctionnement des vergences fusionnelles	0,4% - 4,7%	0,4%	Enfants	Clinique	NR	Scheiman et al., 1996
			4,7%	Enfants/JA	Clinique	3	Paniccia et Ayala, 2015
			1,5%	Adultes	Université	3	Porcar et Martinez-Palomera, 1997
			0,6%	Adultes	Université	3	Garcia-Munoz et al., 2016
			1,8%	Adultes	Clinique	3	Montés-Mico, 2001
Phories verticales	0,2%	0,2%	Enfants	Clinique	NR	Scheiman et al., 1996	

NR : non renseigné

JA : jeunes adultes

Prévalence générale des dysfonctionnements de l'accommodation (Partie 1)

	Dysfonctionnement	Prévalence	Prévalence par étude	Tranche d'âge	Origine de la population	Nombre de signes cliniques requis	Auteurs
Désordres accommodatifs	Insuffisance accommodative	2% - 61,7%	2%	Enfants	Clinique	3	Scheiman et al., 1996
			8%	Enfants	Clinique	NR	Dwyer, 1992
			9,9%	Enfants	Ecole	2	Rouse et al., 1999
			61,7%	Enfants	NR	1	Abdi et al., 2005
			39%	Enfants/JA	Clinique	3	Paniccia et Ayala, 2015
			4,9%	Adultes	Clinique	4	Lara et al., 2001
			6,2%	Adultes	Université	5	Porcar et Martinez-Palomera, 1997
			11,4%	Adultes	Clinique	4	Montés-Mico, 2001
			2,3%	Adultes	Université	3	Garcia-Munoz et al., 2016
	Excès accommodatif	1,8% - 10,8%	1,8%	Enfants	Clinique	NR	Scheiman et al., 1996
			8%	Enfants	Clinique	NR	Dwyer, 1992
			5,1%	Enfants/JA	Clinique	4	Paniccia et Ayala, 2015
			9%	Adultes	Clinique	5	Lara et al., 2001
			10,8%	Adultes	Université	5	Porcar et Martinez-Palomera, 1997
			2,9%	Adultes	Université	3	Garcia-Munoz et al., 2016
			6,5%	Adultes	Clinique	3	Montés-Mico, 2001

Prévalence générale des dysfonctionnements de l'accommodation (Partie 2)

	Dysfonctionnement	Prévalence	Prévalence par étude	Tranche d'âge	Origine de la population	Nombre de signes cliniques requis	Auteurs
Désordres accommodatifs	Inertie accommodative	0,4% - 7,6%	1,2%	Enfants	Clinique	NR	Scheiman et al., 1996
			5%	Enfants	Clinique	NR	Dwyer, 1992
			7,6%	Enfants/JA	Clinique	3	Paniccia et Ayala, 2015
			6,4%	Adultes	Clinique	3	Montés-Mico, 2001
			0,4%	Adultes	Clinique	2	Lara et al., 2001

NR : non renseigné

JA : jeunes adultes

Les tableaux présentés ci-avant montrent une plus forte prévalence pour les désordres de vergence de type insuffisance et excès de convergence, provoquant majoritairement des symptômes en vision proche. Les dysfonctionnements de vision binoculaire se retrouvant en vision de loin sont en effet beaucoup moins fréquents (excès et insuffisance de divergence, par exemple). Notons que la vision de près est aujourd'hui de plus en plus sollicitée, du fait de la sédentarisation de nos activités, et surtout, elle est utilisée de manière intensive dans toutes les tâches de lecture, d'apprentissage et en association avec les processus cognitifs de haut niveau.

Si l'on se focalise ensuite sur la prévalence des désordres accommodatifs, ils sont rencontrés dans 60 à 80% des cas chez des personnes présentant déjà des désordres de vergence (Hokoda, 1985 ; Hoffman et al., 1973). Nous sommes donc face à une situation complexe : la majorité des désordres de vergence et d'accommodation vont particulièrement entraîner des perturbations à des distances où les populations portent leur regard et travaillent la plupart du temps. Nous pouvons nous interroger sur de l'impact de ces dysfonctionnements, tous mineurs qu'ils soient, sur la qualité de la vision et sur le fonctionnement cognitif. Dans le cadre de notre travail, nous étudierons des personnes avec des désordres de vergence dans le plan horizontal, présentant un rapport vergence/accommodation anormal. Les problèmes verticaux, bien qu'handicapants, ne représentent qu'une faible prévalence dans la population.

4.6. Le cas particulier de l'insuffisance de convergence (IC)

L'insuffisance de convergence (IC) est le dysfonctionnement le plus rencontré en clinique. En effet, de par les différents constats réalisés précédemment, il est possible d'estimer la part d'individus présentant une IC à 5% (Cooper et Jamal, 2012) de la population totale. Les signes cliniques principaux pour diagnostiquer une IC ont été d'abord présentés par Von Graefe (1855) puis Duane (1886), qui s'attachaient à 3 caractéristiques principales : (1) un Punctum Proximum de Convergence éloigné de plus de 3 pouces (7.6cm), (2) une exophorie plus importante en vision proche qu'en vision lointaine et (3) des réserves fusionnelles en convergence diminuées. Comme en témoigne les tableaux précédents, la présence de ces 3 signes n'est pas toujours respectée par tous les cliniciens pour établir le diagnostic. Certains s'attachent à un signe en particulier, comme celui du Punctum Proximum de Convergence important (Norn, 1966 ; Letourneau et al., 1979), quand d'autres estiment que l'exophorie en vision proche est indispensable pour confirmer la présence d'une IC (Rouse et al., 1998). Ces

signes sont malgré tout le témoignage indéniable de l'existence d'une difficulté à mettre en jeu et à contrôler correctement l'effort de convergence.

4.6.1. Symptomatologie de l'insuffisance de convergence

De nombreuses études sur le sujet ont montré une recrudescence de plaintes concernant d'une part la qualité de la vision (vision floue, vision double) et d'autre part concernant le confort du sujet dans le temps (yeux douloureux, maux de tête frontaux, paupières lourdes et sensation d'endormissement, perte de concentration, larmoiement, vertiges, nausée...), particulièrement en vision proche et après un travail prolongé (White et Brown, 1939 ; Davies, 1946 ; Mayou, 1946 ; Kent et Steeve, 1953 ; Passmore et MacLean, 1957 ; Mahto, 1972 ; Duke-Elder, 1973 ; Mazow, 1971 ; Mould, 1970 ; Capobianco, 1953 ; Burian, 1971). Ces symptômes s'avèrent invalidants d'une part, et peuvent être mis en lien direct avec les problèmes de maintien de l'attention et d'endurance lors des activités en vision proche comme la lecture.

De plus récentes études se sont attardées sur la symptomatologie caractéristique de ce trouble, en particulier l'équipe de Rouse et Borsting (1999, 2003 et 2004), qui ont établi une échelle de symptômes rencontrés avec une plus grande fréquence chez les sujets diagnostiqués cliniquement avec une IC, afin de mettre au point un premier outil efficace de dépistage. Le CISS (« Convergence Insufficiency Symptom Survey ») est en réalité une série de 15 questions portant sur les plaintes visuelles ou liées à la vision lors d'activités rapprochées. A chacune de ces questions, le sujet doit indiquer la fréquence du symptôme perçu (« Jamais, Peu fréquemment, Parfois, Assez souvent et Toujours »). Plus celui-ci est rencontré, plus cela va engendrer de points (de 0 à 4). Cette échelle permet donc de chiffrer un niveau symptomatologie par un score additionné des réponses des 15 questions, avec potentiellement 60 points cumulables, en lien direct avec la fréquence des troubles.

N°	Question
1	Avez-vous les yeux fatigués lors de la lecture ou d'activités rapprochées ?
2	Ressentez-vous un inconfort au niveau des yeux lors de la lecture ou d'activités rapprochées ?
3	Avez-vous des maux de têtes lorsque vous lisez ou lors d'une activité rapprochée ?
4	Ressentez-vous une sensation d'endormissement lorsque vous lisez ou lors d'une activité rapprochée ?
5	Avez-vous des problèmes de concentration pendant la lecture ou une activité rapprochée ?
6	Avez-vous des difficultés à mémoriser ce que vous lisez ?
7	Vous arrive-t-il de voir double lorsque vous lisez ou lors d'une activité rapprochée ?
8	Avez-vous l'impression que les mots semblent bouger, sauter, nager, flotter sur la page lorsque vous lisez ?
9	Avez-vous l'impression de lire lentement ?
10	Ressentez-vous des douleurs au niveau des yeux lors de la lecture ou d'une activité rapprochée ?
11	Vous arrive-t-il d'avoir les yeux qui rougissent pendant la lecture ou une activité rapprochée ?
12	Ressentez-vous comme une sensation d'« yeux qui tirent » autour des arcades lors de la lecture ou d'une activité rapprochée ?
13	Les mots deviennent-ils flous, même de façon intermittente, pendant un travail rapproché ou de lecture ?
14	Vous arrive-t-il de perdre le fil de votre lecture ?
15	Avez-vous besoin de relire des phrases ou un paragraphe ?

Echelle CISS, traduit de l'anglais. D'après Borsting et al., 2003.

Les différentes études ont montré qu'il était possible de suspecter la présence d'une IC de façon fiable à partir d'un score rapporté supérieur ou égal à 21 chez un adulte et 16 chez un enfant (Borsting et al., 2003 ; Rouse et al., 2004). Plus utile encore, cette échelle permet aussi d'évaluer globalement la symptomatologie en rapport avec un dysfonctionnement, et ainsi de pouvoir apprécier l'efficacité d'un traitement, comme ça a été le cas dans plusieurs études récentes (Barnhardt et al., 2012 ; CITT study group, 2008, 2009 ; Teitelbaum et al., 2009). Si l'on se focalise plus particulièrement sur les questions posées avec cette échelle, on constate que certaines font référence directement aux plaintes visuelles rencontrées, quand d'autres se focalisent sur les problèmes pendant la lecture (mémorisation, relecture de la même ligne ou du même paragraphe, problème de concentration ou à rester concentré...). Ces plaintes caractéristiques ont été typiquement expérimentées pendant la tâche de lecture chez les personnes présentant une insuffisance de vergence. Les liens entre ce dysfonctionnement et les qualités de lecture ne sont pas exactement établis aujourd'hui, et ce constat fera l'objet

d'un approfondissement ultérieur car étant indirectement lié à la problématique de nos travaux.

La pratique clinique présente cependant une limite concernant l'évaluation de la fréquence ou du nombre des symptômes. En effet, une récente étude de Bade et al. (2013) a montré qu'aucune corrélation significative n'était retrouvée entre la sévérité de l'insuffisance de convergence, évaluée en tenant compte du nombre de mesures cliniques hors normes, et le score de symptomatologie, évaluée avec le questionnaire CISS. Ce score reste donc un bon indicateur de la nécessité à traiter le trouble de vergence, mais sa valeur n'est pas directement représentative d'une quelconque mesure clinique. L'association des désordres d'IC et d'insuffisance accommodative, pour lesquels des symptômes similaires sont retrouvés en vision proche, a fortement tendance à augmenter significativement le nombre et la fréquence de symptômes expérimentés chez les enfants (Borsting et al., 2003). A ce titre, Marran et al. (2006) ont montré que l'insuffisance accommodative était la source principale des signes asthénopiques dans ce cas précis et pour cette population. Certaines insuffisances de convergence restent donc « silencieuses », asymptomatiques, et ce phénomène est très souvent lié aux habitudes visuelles et aux activités vers lesquelles la personne se tourne, avec parfois l'évitement de certaines distances de travail. On notera ici la difficulté clinique, entre symptomatologie et mesure clinique du dérèglement des vergences et de l'accommodation.

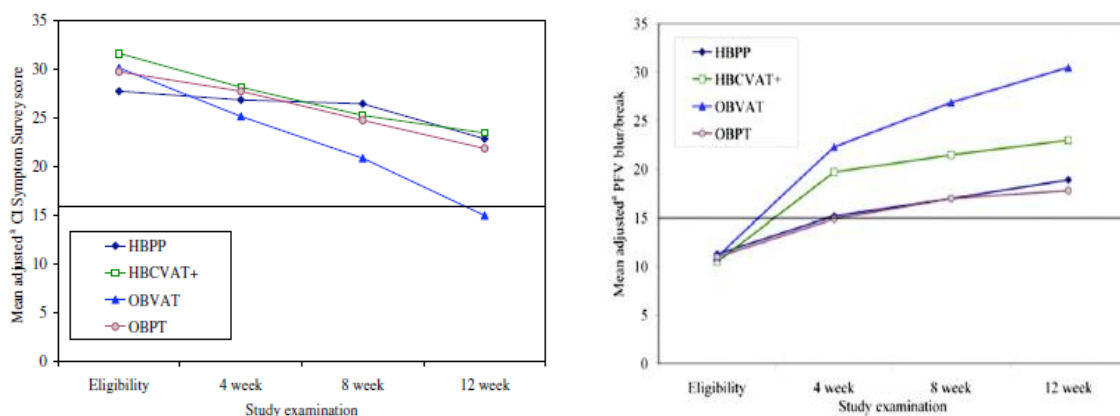
4.6.2. Traitement de l'insuffisance de convergence, liens entre mesures cliniques et symptomatologie

L'insuffisance de convergence, par sa prévalence et les difficultés qu'elle entraîne en vision rapprochée, c'est-à-dire à la distance où le système visuel sera sollicité pour la lecture, le travail informatique ou encore pour l'utilisation de la plupart des outils numériques actuels, a fait l'objet de nombreuses études concernant sa prise en charge. Depuis maintenant plusieurs dizaines d'années, orthoptistes et optométristes ont montré que ce type de dysfonctionnement se corrigeait avec l'entraînement visuel chez la majorité des individus.

Il existe plusieurs méthodes pour traiter l'insuffisance de convergence. Il s'agit d'exercices pour augmenter l'amplitude maximale de convergence. Ces exercices typiques peuvent être réalisés par le patient directement chez lui, peuvent se pratiquer en espace réel ou en faisant appel à l'outil informatique. Ils consistent en général à rééduquer d'abord la motricité

grossière en l'associant à un entraînement de la convergence, en espace virtuel pour commencer et en espace réel pour finir. De nombreuses études se sont focalisées sur l'efficacité des traitements, afin d'isoler les exercices ou le matériel le plus adéquat (Cooper et Jamal, 2012 ; CITT group, 2008 ; Barnhardt et al., 2009), sans jamais véritablement prendre position pour une méthode plus que pour une autre. L'entraînement visuel dépend en effet grandement des habitudes du clinicien, mais il est à noter que nombre d'entre eux utilisent les méthodes combinant des « pencil push-ups » (pendant lesquelles le sujet doit rapprocher un stylo progressivement de son nez en maintenant la vision simple), et des exercices au stéréoscope, synoptophore et vectogrammes/tranaglyphe/cartes en espace réel à réaliser en partie en consultation et en partie chez soi (Cooper et Jamal, 2012).

L'efficacité de ce type de traitement a été prouvée sur une majorité d'individus : sur un total de 16 études réalisées entre 1940 et 1999, une compilation de Jamal et Cooper (2012) montre seulement 7.6% d'échec quand 73.4% des individus sont considérés comme sains par la suite. Une part de 19% montre une amélioration dans les aspects diagnostiqués comme dysfonctionnels, cependant ne peuvent être considérés comme soignés, par la persistance de symptômes et/ou par des mesures en deçà des normes. Si l'on approfondit les résultats de l'étude réalisée par le CITT group (2008) chez des enfants présentant une IC associée à de forts symptômes et pendant laquelle un suivi régulier de la symptomatologie et des mesures optométriques ont été réalisées sur une période de 12 semaines, on constate que la diminution des symptômes s'est faite conjointement à l'augmentation des capacités en convergence et au raccourcissement du Punctum Proximum de Convergence.



Evolution de la symptomatologie (figure de gauche) et de l'amplitude des réserves en convergence (figure de droite) au cours du temps pendant différentes rééducations de la vergence : HBPP (pompes au stylo uniquement, réalisé chez soi), HBCVAT+ (entraînement informatisé associé à des pompes au stylo, réalisé chez soi), OBVAT

(exercices réalisés en consultation régulière), OBPT (exercices régulier réalisés chez soi associés à des exercices placebo réalisés en consultation). D'après le CITT group (2008).

Le suivi montre une stabilisation de la situation pour la majorité des sujets après un an, comme dans l'étude plus récente de Shin et al. (2011). Ces résultats amènent à réflexion s'agissant de la capacité du système visuel à améliorer ses performances en vergence. Il apparait en effet que la neuroplasticité serait directement impliquée dans une telle évolution. Ce point sera débattu plus longuement concernant les suites d'une rééducation dans l'interaction entre saccades et vergence.

4.7. Adaptation lente des réponses A-V

Si l'ajustement accommodatif et l'angle de vergence doivent être maintenus, une « réponse lente » a été observée et mesurée dans la pratique clinique. On constate son action après plusieurs minutes pendant lesquelles le sujet doit maintenir son regard à la même profondeur, une fois la netteté et la simplicité de la cible accomplies. Un mécanisme de vergence et d'accommodation d'adaptation se met progressivement en place pendant les premières minutes, et prend le relais du mécanisme de vergence de disparité et d'accommodation réflexe (Schor et Kotulak, 1986 ; Jiang, 1995). Il est donc stimulé à la base par les composantes « rapides » de vergence de disparité et d'accommodation associée (CA/C) pour la vergence et par les composantes d'accommodation réflexe et de vergence associée (AC/A) pour l'accommodation, et vise justement à réduire l'action de ces mêmes composantes dans le temps, n'étant pas amenées à être maintenues en l'état sur une durée prolongée. Il est possible de constater l'action du mécanisme de vergence d'adaptation lors du port d'un prisme : au tout départ, le prisme va créer une disparité rétinienne qui stimulera une réponse rapide pour maintenir la vision simple par le biais du mécanisme de vergence de disparité, mais celui-ci va de ce fait aussi stimuler l'accommodation par le biais de l'accommodation de convergence (CA/C). Si ce mécanisme répond de façon adéquate, la phorie, position de repos physiologique du couple oculaire, ne sera pas la même après 15 minutes de port en comparaison de celle mesurée lors de l'adjonction du prisme (Schor, 2009). De façon similaire, le port d'une correction sphérique différente va entraîner un ajustement accommodatif différent par le biais de l'action du mécanisme d'accommodation réflexe. Ce nouvel ajustement accommodatif aura un impact, par le biais de la convergence accommodative, sur le positionnement des phories. Ici encore, si le mécanisme d'adaptation se met en place de façon appropriée, la phorie relevée après 15 minutes de port ainsi que la

mesure du retard accommodatif auront été modifiées par rapport à leur niveau de base au moment du changement sphérique.

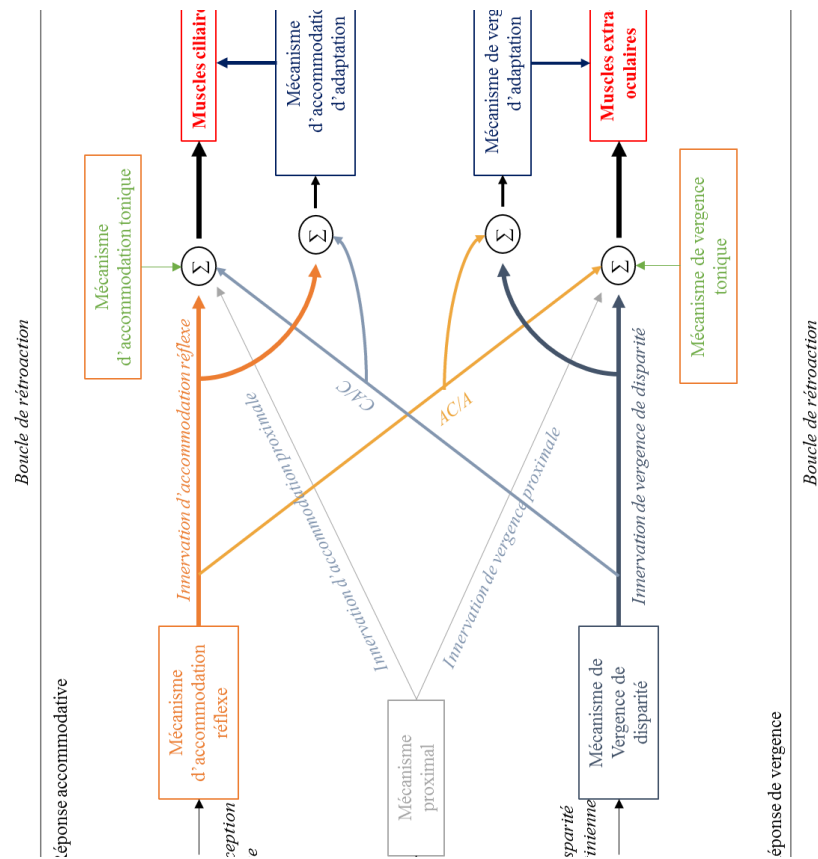


Schéma représentatif de la réponse « lente » en convergence et en accommodation. Les mécanismes « lents » de vergence et d'accommodation sont représentés en violet. Ils sont tous deux stimulés respectivement par l'action primaire des mécanismes de vergence de disparité et d'accommodation de convergence pour le premier et par l'action du mécanisme d'accommodation réflexe et de la convergence accommodative pour le second. Leur action est constatée après plusieurs minutes de maintien statique de la réponse, et elle vise à soulager l'action des mécanismes « rapides » cités précédemment par le biais de la boucle de rétroaction.

Il est très fréquent de retrouver un mécanisme lent défaillant chez les sujets présentant des dysfonctionnements de la vergence et/ou de l'accommodation (North et Henson, 1981 ; Schor et Homer, 1989), ce qui tend à expliquer une partie des symptômes rapportés par nombre d'entre eux. A ce titre, les traitements qui visent à corriger leur désordre par le port d'un prisme ou d'une compensation sphérique modifiée se doit d'être testée au préalable et sur un temps prolongé. En effet, la réponse lente n'étant vraisemblablement pas générée de façon égale par les différentes composantes « rapides » (McCormack et Fisher, 1996), on ne peut anticiper l'efficacité de ce type de traitement sans l'essayer sur un temps suffisant.

Les récentes recherches se sont focalisées sur les désordres de la vergence, et plus particulièrement sur l'insuffisance de convergence (IC). Si le mécanisme lent de vergence est rapporté comme défaillant (North et Henson, 1981) et ne réduisant pas assez la phorie induite par un prisme, la part de convergence accommodative est elle aussi anormalement élevée dans la réponse de vergence finale (Sreenivasan et Bobier, 2014) et témoigne d'un équilibre global fragile. Revenant sur la Figure précédente, cette constatation peut aisément se comprendre : le système visuel tente de palier les carences des réserves fusionnelles et du mécanisme adaptatif en stimulant de façon plus importante la part de la convergence provenant de l'accommodation (AC/A). Cela explique aussi parfois la présence d'un retard accommodatif inexistant voir d'un *lead*, signifiant que le sujet focalise son accommodation en avant de sa cible, ce qui n'est pas physiologiquement retrouvé chez la majorité. Thiagarajan et al. (2010) ont montré la relation indirecte entre les limites des réserves de vergence fusionnelles (« réponse rapide ») et la capacité à déployer le mécanisme lent de vergence. Ils ont mesuré les réactions des sujets suite à l'adjonction de prismes base externe (stimulant la réponse en convergence) au cours du temps, l'angle de vergence devant être maintenu en vision proche à distance fixe. L'action du mécanisme lent de vergence, qui était diminué chez les sujets diagnostiqués IC car plus lente à se mettre en place et de plus faible amplitude, s'est vue largement renforcée après un traitement orthoptique : elle se déployait plus rapidement et en amplitude plus importante qu'auparavant, et ces résultats étaient associés à une augmentation des réserves fusionnelles en convergence et à une diminution significative des symptômes visuels rapportés lors d'activités prolongées en vision proche. Sreenivasan et Bobier (2015) font état de conclusions similaires, mais constatent de surcroît que la part de la convergence accommodative dans la réponse de vergence totale est bien diminuée après une rééducation orthoptique, ce qui témoignerait d'un rééquilibrage en lien direct avec la mise en place plus rapide et d'amplitude plus importante du mécanisme lent de vergence.

4.8. Dysfonctionnement A-V : impact sur la lecture et l'attention

Les liens entre dysfonctionnements A-V et difficultés en lecture, d'apprentissage et problèmes d'attention ont fait l'objet de nombreuses études cliniques. Fréquemment mis en lien avec la symptomatologie ressentie évaluée à l'aide des échelles pré-étalonnées (CISS, Rouse et al. 2009; FCVD QOL, Maples, 2002), elles se focalisent sur les résultats des tests cliniques concernant les mesures de vergence et d'accommodation ainsi que les diagnostics des dysfonctionnements détaillés précédemment, et les croisent avec les performances de lecture

ou les performances scolaires. Durant la tâche de lecture, effectuée habituellement en vision proche, l'angle de vergence doit rester stable et les axes visuels doivent se croiser à la profondeur du livre pour percevoir le texte de façon simple, et l'accommodation est aussi primordiale pour focaliser les images du texte sur les rétines durant toute la durée de l'activité. Ici cependant, il n'est aucunement fait mention de motricité, d'interaction avec les mouvements de saccades ni même de coordination binoculaire de ces dernières, pourtant essentielles à la tâche de lecture. Cette première approche, bien que sommaire et se basant sur des tests subjectifs réalisés de façon statique, nous a permis d'aborder la problématique de notre travail sous un angle différent, en intégrant par la suite l'utilisation de mesures objectives en temps réel de la trajectoire des mouvements oculaires. Nous allons désormais effectuer une revue de littérature exhaustive concernant les études cliniques déjà réalisées.

4.8.1. Etudes épidémiologiques de l'impact sur la lecture

Grisham et al. (2007) ont étudié sur un échantillon de lycéens (15.4 ans de moyenne d'âge) isolés comme « mauvais lecteurs » par leurs propres professeurs. Ils ont montré qu'il y avait bien un lien entre difficulté de lecture et problème d'accommodation ou de vergence, car la majorité (80%) d'entre eux présentaient au moins un test hors norme parmi trois tests cliniques classiques de dépistage des troubles d'accommodation et/ou de convergence (Punctum proximum de convergence, réserves fusionnelles en vision de près et flexibilité accommodative). En cela, ces auteurs ont apporté des preuves supplémentaires aux études plus anciennes et donnant des conclusions similaires (Simons et al., 1987 ; Scheiman et al., 1994).

D'autres études réalisées avec un dépistage préalable des difficultés de lecture au niveau scolaire ont fait état de problèmes relatifs aux réserves en convergence et divergence chez les enfants ou adolescents diagnostiqués comme « mauvais lecteurs » (Eames, 1934 ; Park et al., 1943 ; Garzia, 1993). Plus particulièrement, on retrouvait une prévalence de sujets en insuffisance de convergence plus importante chez les mauvais lecteurs. Cependant aucun lien de cause à effet n'a été encore établi distinctement. Palomo-Alvarez et al. (2010) ont par exemple étudié plus particulièrement de jeunes enfants non dyslexiques mais diagnostiqués comme de mauvais lecteurs pour leur âge. En comparant leurs résultats lors de tests optométriques à ceux d'un groupe contrôle de normaux-lecteurs du même âge, seules les réserves fusionnelles en divergence en vision de loin étaient significativement moins élevées chez eux que chez les normaux-lecteurs.

Les auteurs cités prennent donc position sur le fait qu'une qualité médiocre des fonctions visuo-motrices, en particulier celles relatives aux capacités de vergence, seraient à l'origine de mauvaises performances en lecture. Si le constat apparaît répété, les explications, elles, sont multiples. En effet, des fragilités au niveau des systèmes de convergence ou d'accommodation sont très souvent responsables de symptômes gênants d'une part : inconfort, douleurs, vision double, maux de têtes, vision floue ou signes de fatigue visuelle (Ciuffreda, 2002 ; Borsting et al., 2003). Ces plaintes rapportées peuvent être désignées comme sources possibles de problèmes en lecture, comme encore dans l'étude de Grisham et al. (1993), faisant référence à des difficultés de concentration en majeure partie, mais aussi à des performances amoindries et/ou accomplies dans un temps plus long. Cette recherche réalisée sur des étudiants fait état d'une corrélation négative entre le nombre de symptômes visuels rencontrés par des étudiants et leur vitesse de lecture d'une part : plus les symptômes étaient rapportés nombreux, plus le temps d'accomplissement était long, ce qui suggère selon les auteurs l'existence d'une connexion entre symptomatologie et difficultés en lecture. D'autre part, les sujets les plus symptomatiques présentaient des résultats significativement moins bons en vocabulaire et en compréhension que les étudiants les moins symptomatiques. Ayant ajouté une phase de relaxation d'une heure avant ou après une heure de lecture, les changements en termes de nombre de symptômes ont pu être étudiés plus précisément, et même si les performances en lecture et compréhension ne sont pas significativement différentes entre l'échantillon d'étudiants présentant des dysfonctionnements binoculaires et les étudiants n'en présentant pas, les étudiants avec dysfonctionnement rapportaient significativement plus de symptômes après une heure de lecture. Ce dernier résultat laisse penser à une interférence accrue des plaintes liées à la demande visuelle sur les performances en lecture chez les populations les plus vulnérables, en l'occurrence celles présentant des dysfonctionnements accommodatifs et/ou de vergence.

Une étude plus récente (Cohen et al., 2010) regroupe différents résultats relatifs à l'activité oculomotrice durant la lecture, la compréhension et les symptômes de fatigue visuelle chez des enfants (8-10ans). Plusieurs corrélations significatives ont notamment été retrouvées entre le temps d'accomplissement d'un test de compréhension et la sévérité des symptômes visuels rencontrés : plus les signes de fatigue visuelle et plaintes étaient rapportées sur une échelle subjective, plus le temps d'accomplissement était long, ce qui témoignerait de l'impact indirect des symptômes liés à la vision sur la rapidité d'exécution d'un tel test de compréhension et qui recoupe en partie les conclusions de Grisham et al. (1993). En outre,

d'autres corrélations, cette fois concernant le nombre de symptômes et les résultats au Developmental Eye Movement (DEM) Test (Richman et al., 1990), dont les résultats sont eux même corrélés aux performances de vitesse en lecture (Ayton et al., 2009), ont été retrouvées, suggérant de nouveau l'impact négatif que peuvent représenter les plaintes liées à des dysfonctionnements binoculaires et/ou accommodatifs sur l'activité de lecture. Le DEM est un test étalonné qui implique la réalisation de saccades sur des chiffres aléatoirement placés, que cela soit en horizontal ou en vertical. Le sujet doit accomplir une série en un minimum de temps possible et en faisant le moins d'erreurs possible, et des études ont permis de mettre en relation ces résultats avec le niveau de lecture qu'un enfant ou adolescent devrait avoir en fonction de son âge scolaire (Garzia et al., 1990). Un résultat similaire à celui de Cohen et al. a aussi été retrouvé, cette fois chez des adolescents diagnostiqués comme présentant des difficultés de lecture (Powers et al., 2008) concernant le DEM, ce qui suggère un lien entre mauvaise motricité binoculaire et problèmes de lecture. Le fait que les performances en lecture classique et lors du test DEM soient corrélées ouvre un peu plus la voie sur un problème moteur relatif à la motricité binoculaire. L'étude de Cohen et al. (2010) montre par analogie que la symptomatologie visuelle, très liée à la qualité de l'accommodation et de la fonction binoculaire, est négativement corrélée à la performance au DEM, elle-même corrélée au niveau de lecture des sujets, et au temps d'accomplissement d'un test de compréhension de lecture.

Cependant, si les études présentées précédemment ouvrent le débat sur l'incidence des symptômes visuels sur la tâche de lecture, d'un point de vue moteur ou cognitif, un approfondissement est nécessaire en ce qui concerne la nature des troubles engendrés. En effet, d'autres études ne trouvent pas d'impact direct de la vision sur la tâche de lecture en elle-même (Handler et al., 2011), mais suggèrent par contre qu'un lien est possible entre plaintes visuelles et difficultés d'apprentissage/compréhension. En d'autres termes, la qualité de la motricité en lecture ne serait pas significativement altérée chez des sujets présentant des troubles de vergence et/ou d'accommodation comparée aux sujets contrôle, mais la capacité d'analyse et de rétention des informations associées au texte, elle, le serait sur le cours ou long terme (Kiely et al., 2001). Toutefois, de véritables mesures objectives des trajectoires de chaque œil en temps réel sont manquantes à ce sujet.

Nous avons pu faire au préalable le récapitulatif des différentes dysfonctions existantes au niveau du système accommodatif et du système de vergence. Dans la majorité des cas, ces

dysfonctionnements entraînent des symptômes spécifiques susceptibles de pénaliser le sujet et le ralentir/l'handicaper dans les tâches qu'il entreprend. De ce point de vue, typiquement clinique, il apparaît logique de penser que les performances cognitives peuvent être impactées, en particulier les capacités d'attention, mais il s'agirait ici d'attribuer cette responsabilité aux symptômes ressentis. Le modèle optométrique aborde majoritairement les désordres d'un point de vue statique. On y expose surtout l'importance du maintien de l'angle de vergence et de l'amplitude d'accommodation adéquate, en insistant sur la symptomatologie rencontrée qu'il s'agit d'atténuer si elle s'avère trop handicapante. Cependant, malgré l'intégration d'une technologie plus évoluée et l'ajout de tests spécifiques à la pratique clinique, l'aspect dynamique n'est qu'assez peu abordé. Or, la motricité binoculaire devrait être plus étudiée à notre sens, en lien avec les désordres cités plus haut. En effet, s'arrêter aux symptômes engendrés par des dysfonctionnements ne suffit pas toujours à expliquer certaines difficultés, concernant les processus cognitifs de haut niveau et la gestion des ressources attentionnelles par exemple, qui font référence à des phénomènes plus complexes et nécessitent des mesures souvent plus précises. L'interaction entre saccade, vergence et accommodation doit être approfondie dans son ensemble, et c'est l'objet du chapitre suivant.

4.8.2. Etudes épidémiologiques en lien avec l'apprentissage

Les problèmes d'apprentissage ont aussi fait l'objet de nombreuses études au niveau optométrique. Etant donné l'implication de la lecture dans ce type de tâche, les résultats sont de nouveau dans la lignée de ceux présentés récemment, et la prévalence des dysfonctionnements A-V, en particulier chez les enfants présentant des difficultés d'apprentissage et de mauvais résultats scolaires, laisse pressentir leur impact important. Pour reprendre les différents auteurs, une première étude de Shin, Park et Park (2009) nous apporte plusieurs résultats allant dans ce sens. Sur un échantillon d'enfants (9-13 ans) présentant des symptômes visuels gênant (échelle FCOVD QOL ; Vaughn et al., 2006), il a été montré que 71.9% d'entre eux présentaient un désordre de vergence et/ou un désordre accommodatif. Les enfants participants ne présentaient cependant pas d'acuité visuelle diminuée, de désordre vertical (hyperphorie) ou d'autres complications visuelles plus importantes (strabisme, amblyopie), critères que nous avons utilisés par la suite pour sélectionner nos cohortes. En comparant ce groupe d'enfants à un groupe contrôle asymptomatique, les résultats ont révélé chez eux des performances scolaires plus faibles dans plusieurs domaines comme la lecture, les mathématiques ou les sciences. Cette étude est importante car elle concerne des dysfonctionnements qui peuvent passer inaperçus pour certains parents, et cependant

potentiellement impacter, directement ou indirectement, la performance scolaire de leur enfant. Les dysfonctionnements A-V sont pressentis pour être un des facteurs majoritaires des difficultés scolaires. L'étude de Maples (2003) montre ainsi que les désordres A-V peuvent s'avérer être les responsables principaux dans les problèmes d'apprentissage, bien avant les caractéristiques socio-économiques ou ethniques très souvent mises en avant.

Si ce constat est dans la lignée des conclusions de Vaughn et al. (2006), Maples (2001 ; 2003), Kedzia et al. (1999), de l'American Optometric Association (1998 ; 2000), de Lee et al. (2013) et en lien direct avec les études précédemment citées concernant la symptomatologie engendrée et les problèmes de coordination en lecture, l'idée en elle-même n'est pas forcément partagée et très débattue (Helveston et al. 1985, Letourneau et al., 1979, American Academy of Pediatrics Committee on Children with Disabilities, American Academy of Ophthalmology and American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus, 1998). Hoffman (1980), Garzia (1994) et Castanes (2003) insistent cependant sur la relation entre désordre de ce type, problèmes d'apprentissage, voir même difficultés de résistance à la frustration engendrée par de mauvais résultats. De nouveau, les précisions manquent au domaine clinique pour mieux cerner les mécanismes responsables de ces déficits, et des mesures sur le comportement de la motricité binoculaire en temps réel pendant ces types de tâches apporteraient des informations supplémentaires essentielles. De plus, les apprentissages font appel au domaine cognitif de haut niveau qui n'est que très peu pris en compte pendant les mesures cliniques, et qui fera l'objet d'une présentation ultérieure.

4.9 Problématique : l'approche optométrique et ses limites

La pratique clinique se focalise sur les deux composantes les plus importantes de la réponse accommodative : la composante réflexe et la part issue de la convergence (accommodation de convergence). Cependant, la mesure du ratio CA/C n'est que très peu abordée, et l'évaluation de la réponse accommodative globale prévaut sur une réelle analyse de la part exacte de chacune de ces deux composantes : l'étude du positionnement accommodatif, de l'amplitude maximale d'accommodation et de la flexibilité accommodative restent les mesures cliniques principales. En ce qui concerne la réponse de vergence, cette même approche ne prend en compte que deux parts majoritaires que sont la vergence fusionnelle (ou vergence de disparité) et la vergence accommodative. Ici encore, les mesures cliniques visent à évaluer la réponse de vergence selon ces deux composantes, et les tests réalisés se focalisent très régulièrement sur l'une d'entre elles. Par exemple, dans le cas de la vergence fusionnelle, les réserves fusionnelles sont mesurées à l'aide de prismes, faisant donc varier la demande de vergence sans faire varier la demande accommodative, créant ainsi un conflit entre les deux réponses. Naturellement dans la vie de tous les jours, les réponses accommodatives et de vergence sont extrêmement liées, car directement dépendantes de la distance ou profondeur de l'objet fixé.

L'approche optométrique cherche à isoler le processus en dysfonctionnement, c'est pourquoi certains des tests cliniques provoquent un découplage de la synergie A-V. Cependant, ces deux domaines restent liés, et la motricité binoculaire n'est que très rarement abordée dans la pratique clinique, malgré son importance cruciale. L'interaction des processus de vergence et d'accommodation avec les saccades, permettant d'orienter le regard vers des positions excentrées de l'espace tridimensionnel, n'est pas étudiée, les tests cliniques se faisant majoritairement avec des cibles immobiles situées dans le champ visuel central. Nous ne pouvons donc rester uniquement dans cette approche trop statique pour un système visuel constamment en mouvement. Des mesures plus fines du comportement oculomoteur pendant certaines tâches comme celle de la lecture apportent quantité d'informations objectives quant au mécanisme éventuel liant dysfonctionnement A-V, motricité binoculaire et cognition, et nous avons fait le choix d'intégrer ces mesures à nos expérimentations.

De plus, les cibles utilisées dans la pratique optométrique ne stimulent pas de réponse cognitive de haut niveau et se résument très souvent à permettre l'orientation du regard et

l'immobilisation de l'accommodation. L'intervention d'une charge cognitive supplémentaire n'est donc pas étudiée en clinique, ce qui rend d'autant plus difficile l'interprétation des résultats précédents concernant les liens entre les dysfonctionnements A-V et les difficultés rencontrées dans les tâches visuelles comme la lecture ou les problèmes attentionnels.

Aussi, la plupart des résultats présentés précédemment ne prennent pas toujours en compte la symptomatologie expérimentée par les sujets. Si celle-ci est devenue un critère principal de diagnostic dans les études les plus récentes avec son évaluation chiffrée par des échelles subjectives, elle est souvent mise en avant comme la cause des problèmes de lecture. Si les liens entre dysfonctionnement de ces types et symptômes visuels sont établis (Ciuffreda, 2002 ; Benjamin, 2006 ; Duke-Elder, 1949 ; Borsting et al. 2003 ; Maples et al., 2002), l'impact sur la coordination binoculaire des saccades et sur la lecture n'est pas évalué ou mesurable via les moyens cliniques. Cet aspect est une des dimensions que nous introduisons dans cette thèse, faisant ainsi le point entre les dysfonctionnements A-V et les répercussions dans d'autres domaines comme la lecture, essentielle à l'apprentissage. De plus, certains troubles asymptomatiques existent, et certains mécanismes comme celui de la suppression corticale peuvent diminuer la symptomatologie. Un problème de motricité binoculaire peut s'avérer être aussi présent chez ces populations, qui ne sont pas étudiées car considérées comme asymptomatiques. Ici encore, la symptomatologie devenant le principal critère d'inclusion pour le diagnostic et le traitement des dysfonctionnements A-V, les éventuelles interactions avec les problèmes de motricité ne sont pas abordées.

Les mécanismes « lents » présentés précédemment concernent les fluctuations susceptibles d'être retrouvées dans les mesures cliniques après un temps de travail prolongé à une distance fixe, ou lorsque la nécessité d'adapter la réponse de vergence ou d'accommodation est stimulée par le port supplémentaire de prismes ou de verres sphériques. Ces mécanismes hypothétiques ne prennent toutefois pas en compte les interactions des réponses de vergence et d'accommodation avec les saccades. En effet, physiologiquement dans la vie de tous les jours, le regard n'est jamais fixé à la même profondeur et au même endroit pendant plus de quelques secondes, le système visuel est constamment en mouvement. Cette constatation physiologique nous pousse ici encore à émettre des réserves quant à l'établissement de ces mécanismes « lents » et à leur probable interaction avec les mouvements de saccade. L'apport de la vidéo-oculographie permettra ici encore une approche différente de celle utilisée dans la pratique clinique.

Les limites que présente le modèle clinique sont donc multiples, à commencer par l'étude des composantes de vergence et d'accommodation elles-mêmes. Le modèle optométrique n'aborde pas non plus les réponses accommodatives et de vergence dans leur temporalité, et les mesures effectuées sont très souvent statiques : soit à distance fixe, soit réalisées sur de très courtes périodes et à l'aide de méthodes subjectives ou nécessitant l'interprétation du clinicien. Dans cette thèse, nous nous positionnons en faveur de l'utilisation de mesures objectives de vidéo-oculographie permettant d'apprécier ces réponses avec plus de précision, sur des durées prolongées et en temps réel, en lien direct avec le comportement physiologique. Dans le cadre de notre travail, nous souhaitons approfondir l'analyse sur les mécanismes à l'origine des interactions entre processus visuomoteurs et cognition. La méthodologie que nous avons adoptée prévoit, en plus de l'utilisation des méthodes cliniques optométriques à des fins de diagnostic et de dépistage, l'étude de la trajectoire exacte des mouvements oculaires grâce à la vidéo-oculographie pendant des tâches visuelles comme la lecture, où les mouvements de saccades sont indispensables à l'exploration du texte. En conséquence, nous aborderons par la suite les caractéristiques des mouvements de saccades et approfondirons leur interaction avec les mouvements de vergence.

CHAPITRE 5 : Mouvements de saccades, fovéation de l'objet et qualité de la vision

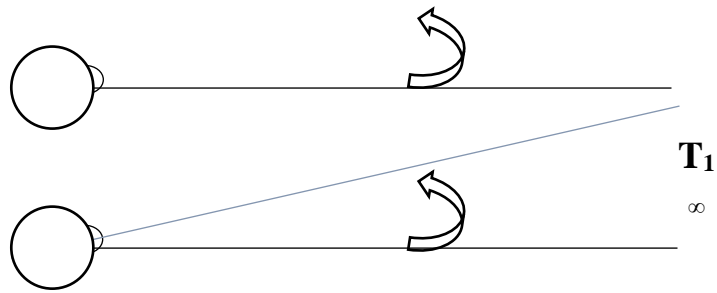
Si l'approche clinique permet de dépister une partie des désordres concernant l'accommodation et la vergence, elle ne tient pas assez compte l'aspect de la motricité binoculaire. Les mouvements de saccade combinés aux mouvements de vergence et aux variations d'accommodation sont pourtant réalisés à tout instant dans la vie de tous les jours. Dans le cadre de notre travail, nous focaliserons nos recherches plus spécifiquement sur l'interaction entre les mouvements de saccades et de vergence, étant donné leur implication dans des tâches spécifiques comme la lecture ou les activités de recherche visuelle et d'attention soutenue en vision proche. Nous présenterons d'abord les mouvements de saccades dans le détail, puis approfondirons sur la controverse encore d'actualité aujourd'hui concernant les interactions entre saccades et vergence.

5.1. Généralités sur les mouvements de saccade

Ce mouvement permet au système visuel d'amener les lignes de regard sur l'objet d'intérêt afin de pouvoir en apprécier les moindres détails. En effet, la fovéa reste le centre de référence de chaque œil qui procure une définition maximale de l'image d'une cible fixée. La première qualité motrice d'un système visuel est donc d'être capable de fixer promptement et avec exactitude les cibles d'intérêt. La précision du mouvement de saccade est donc un premier indicateur de la qualité du système visuel d'un point de vue moteur. Afin de présenter les différents aspects fonctionnels de la saccade, nous nous appuierons majoritairement sur les travaux de Leigh et Zee (2016), Vernet (2009) et Gaertner (2014).

5.1.1. Description et morphologie de la saccade

Un mouvement de saccade va permettre très rapidement aux deux yeux d'amener leur ligne de regard sur un objet situé en périphérie. Ce mouvement de rotation s'effectue dans le même sens pour les deux yeux, il s'agit donc d'un mouvement conjugué. Une saccade pure se fait sur une cible se situant dans le même plan en profondeur que le point de fixation de base (plan fronto-parallèle). Les mouvements peuvent se produire dans les plans horizontaux, verticaux ou obliques.



Mouvement de saccade vers la gauche dans le plan horizontal, couple oculaire en vue de dessus. Les lignes noires représentent la position des axes visuels fixant l'objet T1 avant la saccade, les lignes bleues représentent la position des axes visuels fixant l'objet T2 après la saccade.

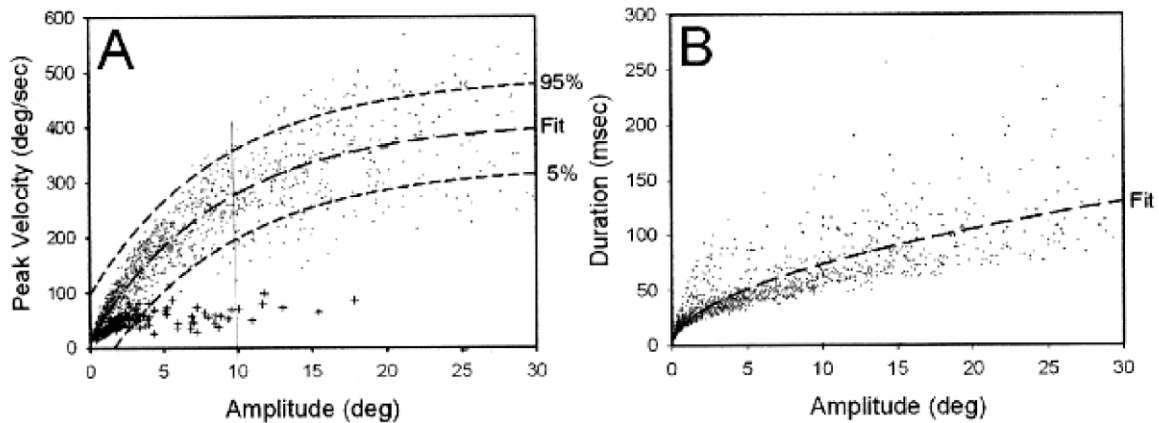


Tracés horizontaux et verticaux de la position des yeux dans le temps lors d'une saccade vers la gauche : la position de l'œil droit et de l'œil gauche a été modifiée dans la même direction, l'angle de vergence et la position verticale des lignes de regard n'ont pas évolué. Mays et al., 1986.

La saccade s'avère être un des mouvements les plus rapides pouvant être effectué par le corps humain, avec des rotations du globe oculaire atteignant jusqu'à 500°/seconde pour une durée dépassant rarement les 100ms. De ce fait, le mouvement de saccade est considéré comme balistique, en boucle ouverte : une fois déclenché, les informations visuelles ne peuvent plus influencer sur sa trajectoire ou sa vitesse, étant donné la rapidité d'exécution (Robinson, 1964).

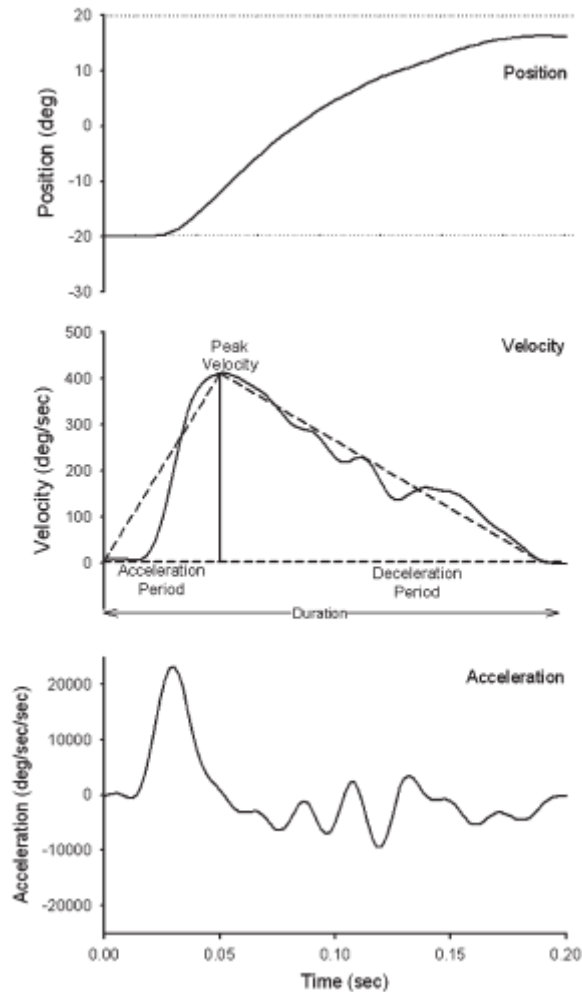
5.1.2. Aspect dynamique

D'un point de vue dynamique, il a été constaté une relation forte entre vitesse, durée et amplitude d'une saccade : plus une saccade est importante en termes d'amplitude, plus son pic de vélocité sera important, et plus sa durée sera longue.



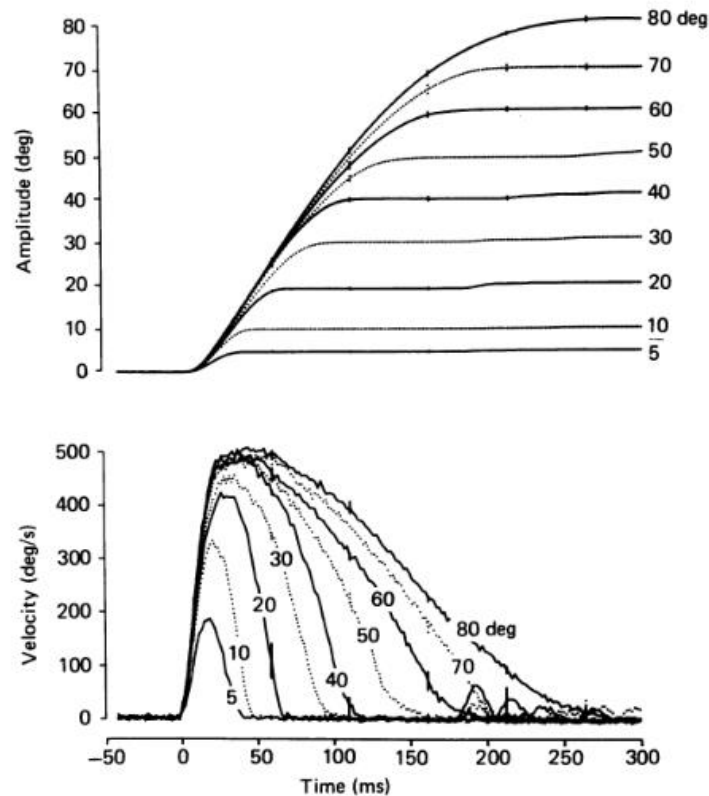
Séquence principale des saccades. Figure A : Pic de vélocité des saccades (degrés/sec.) en fonction de leur amplitude (degrés). Figure B : Durée de la saccade (ms) en fonction de leur amplitude. Points : données enregistrées sur 10 sujets sains. Croix : données enregistrées sur des patients souffrants de la maladie de Niemann Pick de type C. D'après Leigh et Zee (2016).

Si nous étudions désormais l'accélération du mouvement pendant la saccade, on constate qu'il est possible de distinguer deux phases : une phase d'accélération en générale courte et rapide comparée à la phase de décélération qui vient ensuite. Le pic de vitesse maximale arrive donc en début de mouvement. Van Opstal et Van Gisbergen (1987) ont étudié le rapport de la durée de la phase d'accélération sur la durée totale de la saccade (*skewness*) et ont montré que ce rapport variait aussi en fonction de la durée des saccades. Dans la même logique, les travaux de Collewyn et collaborateurs (1988 a et b) sont venus ajouter que pour des saccades de grande amplitude, l'accélération était légèrement augmentée, décalant le pic de vitesse vers le début du mouvement, et ce, quel que soit la direction de la saccade (horizontale ou verticale).



Tracé d'un enregistrement d'une saccade horizontale de 36° vers la droite (figure du haut pour la position), avec la vitesse, son pic et les phases d'accélération et de décélération correspondants dans le temps (figure du milieu) ainsi que le tracé de l'accélération dans le temps (figure du bas). D'après Leigh et Zee, 2016.

Les caractéristiques dynamiques d'une saccade sont donc stables et très largement déterminées par son amplitude. Elles ne sont donc pas sous contrôle volontaire. Cependant, certains facteurs peuvent légèrement influencer le pic de vitesse et la durée d'une saccade : des facteurs extrinsèques (luminosité, fréquence de présentation des cibles...), intrinsèques à l'individu (si la saccade est couplée à une action de la main...), le type de saccade (volontaire vs réflexe) ou encore la direction de la saccade (centripète quand le mouvement se fait de la périphérie vers le centre, centrifuge quand le mouvement se fait du centre vers la périphérie) par exemple (Leigh et Zee, 2016).



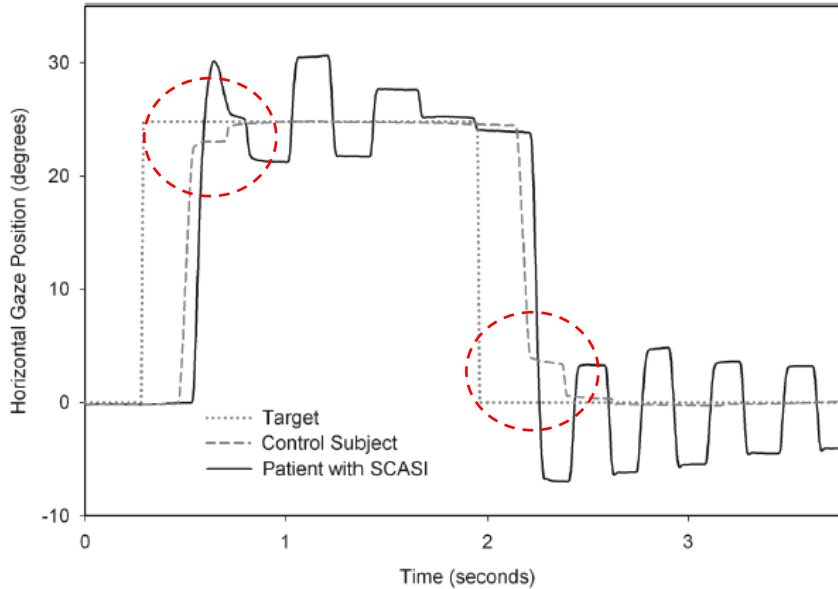
Tracé de saccades horizontales pour différentes amplitudes et pics de vitesse associés. D'après Collewijn et al., 1988a

5.1.3. Précision d'une saccade

L'objectif principal d'un mouvement de saccade est d'amener l'axe visuel sur l'objet d'intérêt ou cible de fixation. Les saccades peuvent donc être horizontales, verticales ou obliques, et cette distinction n'est pas liée au hasard étant donné l'existence de générateurs de saccades horizontales et verticales distincts au niveau du tronc cérébral. Il est cependant très fréquent qu'une saccade n'atteigne pas exactement sa cible, et nous retrouvons dans les différentes directions des erreurs de position en fin de mouvement par rapport à la position réelle de la cible (Collewijn et al., 1988a et b) : les saccades peuvent être hypermétriques (cible dépassée, *overshoot*) ou hypométriques (cible non atteinte, *undershoot*) : on retrouve plus fréquemment de saccades hypermétriques lorsque leur amplitude est faible et/ou que la saccade est centripète (orientée de la périphérie vers le centre), et plus fréquemment de saccades hypométriques lorsque leur amplitude est importante et/ou que la saccade est centrifuge. Ce constat est surtout marqué concernant les saccades horizontales, on retrouve le plus souvent des saccades hypométriques, en particulier dans le cas de saccades de grandes amplitudes, de saccades centrifuges (du centre vers la périphérie ; Collewijn et al., 1988a) ou pour des saccades vers des cibles non prédictibles (Troost et al., 1974). Concernant les saccades

verticales, on retrouve le plus souvent des saccades hypométriques lorsqu'elles sont orientées vers le haut et hyperméttriques lorsqu'elles sont orientées vers le bas (Collewijn et al., 1988b). L'effet de gamme, ou « *range effect* » (Kapoula, 1985 ; Kapoula et Robinson, 1986), impacte lui aussi la précision des saccades. On le retrouve lorsque les cibles proposées se retrouvent autour d'un point central de fixation, à différentes positions : une hypermétrie se constatera plus souvent pour les cibles proches du point de fixation quand une hypométrie sera majoritairement présente pour les cibles plus éloignées.

En conséquence, et étant donné la nature balistique du mouvement de saccade, des saccades d'ajustement ou correctives sont très souvent retrouvées 100 à 150ms après le début d'une saccade hypermétrique (Becker et Fuchs, 1969). Le mouvement total est donc divisé en deux parties : une première saccade « imprécise » mais qui couvrira partiellement l'amplitude à accomplir initialement dans le cas d'une saccade hypométrique et qui dépassera l'amplitude à accomplir dans le cas d'une saccade hypermétrique ; et une deuxième saccade de bien plus faible amplitude, orientée dans le même sens que la première dans le cas des saccades hypométriques ou en sens opposé à la première dans le cas des saccades hyperméttriques. Ces saccades de correction sont donc très souvent basées sur l'erreur retrouvée à la fin du premier mouvement, mais peuvent aussi résulter de signaux extra-rétiniens (Ohtsuka et al. 1989). Leur rôle est ici de terminer le mouvement afin d'amener exactement l'axe visuel sur la cible.



Exemple de saccades horizontales de 25° réalisées par un sujet sain (tracé pointillé gris) et par un sujet atteint de dégénérescence spino cérébelleuse (SCASI, tracé noir). Pour le sujet sain, les saccades sont à chaque fois hypométriques quel que soit la direction de rotation (cercles pointillés rouges). Adaptée de Leigh et Zee, 2016.

Pendant la saccade, un phénomène de suppression des entrées visuelles est en général constaté, afin de permettre une perception stable de l'environnement, tant l'œil et les images glisseront rapidement sur la rétine pendant l'exécution du mouvement (Zuber et Starck, 1966).

5.1.4. Différents types de saccades

Les travaux de Leigh et Zee (2016) différencient plusieurs types de saccades, dépendant de l'aspect volontaire ou réflexe. Par exemple, les saccades permettant l'exploration d'une scène visuelle sont d'ordre volontaire, mais nous retrouvons aussi dans cette classification les mouvements de saccades en direction d'une cible dont on connaît le moment et la position d'apparition (saccade prédictive), en direction d'une cible préalablement mémorisée (saccade de mémoire), ou encore les mouvements de saccades qui vont à l'opposé de la direction de présentation d'une nouvelle cible, après instruction (anti-saccade). Ces différents types de saccades vont particulièrement nous intéresser dans le cadre de notre travail, étant donné qu'elles vont exiger un haut niveau de contrôle cognitif, faire intervenir l'aspect décisionnel du sujet et beaucoup être en lien avec l'activation des fonctions exécutives cognitives. De ce fait, leur latence est plus longue (souvent supérieure à 200ms) que pour des saccades dites « réflexes ». En effet, il est nécessaire de déplacer l'attention visuelle vers une nouvelle cible

pour effectuer un mouvement dans cette direction, et cela entraîne la sollicitation de circuits cérébraux spécifiques (Gaymard, 2012).

Les saccades dites « involontaires » diffèrent des saccades volontaires par leur nature, étant liées très souvent à un mouvement réflexe. Les saccades résultant de l'apparition brutale d'un stimulus extérieur, qu'il soit visuel, sonore ou d'autre nature, sont en effet observées lors de situations d'urgence, et résultent d'une transformation directe, sans passer par le cortex frontal, du signal visuel en commande motrice. Ainsi, leur temps de latence est diminué par rapport aux saccades volontaires (entre 80 et 120ms ; Fischer et Ramsperger, 1984), en grande partie du fait de l'interaction minimum avec l'aspect cognitif. Les saccades automatiques, enregistrées pendant les réflexes vestibulo-oculaires (VOR) ou les réflexes opto-cinétiques (OKN), les saccades spontanées, ou encore les saccades retrouvées pendant les phases de sommeil paradoxal (*Rapide Eye Movement*, REM) entrent aussi en compte dans la classification des saccades involontaires ou réflexes.

Les saccades peuvent être spécifiquement étudiées en recherche en fonction de leur type, grâce à des paradigmes précis. Par exemple, concernant les saccades volontaires, le paradigme « *overlap* » (Lee et al., 2005 ; Wright et al., 2011) va permettre d'afficher une première cible de fixation puis de faire apparaître une deuxième cible alors que la première est encore visible. Pour réaliser une saccade sur la seconde, le sujet devra désengager son attention de la première et ainsi réaliser une action volontaire. Concernant les saccades involontaires, le paradigme « *gap* » (Fischer et Ramsperger, 1984 et 1986) consiste à afficher une première cible qui va disparaître avant l'apparition de la deuxième. Un court laps de temps est introduit ici entre l'affichage de deux stimuli pendant lequel le sujet n'a donc plus de cible de fixation. Le sujet réalisera donc un mouvement réflexe de saccade sur la deuxième cible, sans avoir à désengager cette fois son attention de la première.

5.2. Neurophysiologie des saccades

L'action de déplacer rapidement les lignes de regard vers un nouvel objet d'intérêt, donc la réalisation d'une saccade, débute tout d'abord par la perception ou la connaissance de la position de la future cible dans le champ visuel du sujet. Le cortex visuel primaire (V1) va donc avoir un rôle primordial dans la détection et la localisation de cette cible. Une fois cette opération réalisée, la commande motrice de la saccade se devra donc d'être précise en amplitude et en direction pour atteindre son but avec le moins d'erreur possible. En d'autres

termes, les coordonnées spatiales de la cible, récupérées sous forme de données visuelles par le cortex VI à la base, vont devoir être transformées de façon précise en message moteur et transmises aux motoneurones responsables ensuite du mouvement. Nous allons étudier le cheminement de cette information et les différentes structures corticales et sous corticales impliquées dans les mouvements de saccade.

5.2.1. Les Motoneurones de la saccade

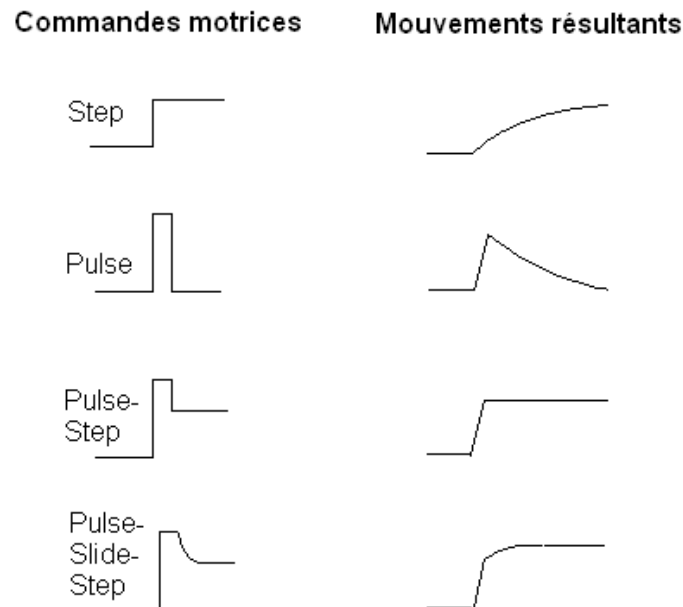
L'activité des motoneurones responsables de la rotation des globes oculaires va entraîner un déplacement de la ligne de regard dans une direction particulière. Grâce aux travaux de Robinson et al. (1990) et aux études d'électrophysiologie chez le singe (Leigh et Zee, 2016), il a été établi que ces motoneurones produisaient des salves de potentiels d'action sous deux formes différentes :

- ✓ Des décharges à hautes fréquences, en bouffée, phasique, « en impulsion » également appelée « *Pulse* », qui vont permettre la rotation du globe oculaire vers la position souhaitée et qui démarrent 8ms avant le début du mouvement (van Gisbergen, Robinson et Gielen, 1981).
- ✓ Des décharges à plus basses fréquences, dites « en échelon », tonique ou « *Step* », qui vont permettre le maintien des yeux sur la cible, consécutives à une commande de positionnement plus qu'à une commande de déplacement.

Il est à noter que la fréquence de décharge des motoneurones est donc fonction de la vitesse de déplacement et de la position du globe oculaire.

Dans le cas d'une saccade, une commande phasique va permettre de déplacer le globe oculaire dans la direction souhaitée et sera suivie d'une commande tonique qui permettra de maintenir la fixation sur la cible. Cependant, la transition entre une commande « *pulse* » et « *step* » ne peut se faire brutalement, étant donné la rapidité d'une saccade. Nous assistons donc de manière générale à une transition progressive, de parfois plusieurs centaines de millisecondes, et que nous avons déjà décrit sous l'appellation de « glissement ». En effet, le décalage entre le déclenchement du « *pulse* » et du « *step* » entraîne une glissade (« *slide* ») des deux yeux dans la même direction que la saccade (glissement conjugué) mais aussi, à moindre amplitude, en sens opposé pour réduire l'asymétrie induite pendant la saccade (glissement disconjugué).

Lors d'une saccade, le message nerveux est en forme « *pulse-slide-step* » pour le muscle agoniste impliqué directement dans la direction de rotation. Le motoneurone du muscle antagoniste a cependant une activité lui aussi (Sindermann et al., 1978) : il reste silencieux pendant la saccade mais reçoit un signal tonique pour le maintien de la position du globe oculaire une fois le déplacement réalisé.



Activités motrices hypothétiques des motoneurones et mouvements résultant correspondants. D'après Vernet (2009).

5.2.2. Commandes prémotrices de la saccade

En nous appuyant sur les travaux de Leigh et Zee (2016), Pierrot Deseilligny (2003), Gaertner (2014), Vernet (2009), Gaymard (2012), nous allons réaliser une liste exhaustive des neurones impliqués dans l'activité prémotrice à l'origine des saccades. Il sera important cette fois de bien distinguer leur direction : les saccades horizontales et verticales n'ont pas les mêmes centres du regard dans la formation réticulaire, mêmes si les neurones impliqués peuvent, eux, avoir des actions similaires sur le mouvement.

Nous ferons d'abord une distinction entre plusieurs grands groupes de neurones responsables du contrôle saccadique (Moschovakis et Highstein, 1994) :

- ✓ **les neurones phasiques ou « *Burst Neurons* » (BN)**, impliqués dans la réponse *pulse* et responsables de la commande de vitesse d'une saccade, ils sont à l'origine de la co-activation des muscles agonistes et de l'inactivation des muscles antagonistes. On retrouve donc une deuxième différenciation parmi eux :

✓ les neurones excitateurs, avec les neurones phasiques excitateurs ou « *Excitatory Burst Neurons* » (EBN) et les neurones phasiques précoces, ou « *Long Lead Burst Neurons* » (LLBN)

✓ les neurones inhibiteurs, avec les neurones phasiques inhibiteurs ou « *Inhibitory Burst Neurons* » (IBN) et les neurones loquets, ou « *Latch Neurons* » (La)

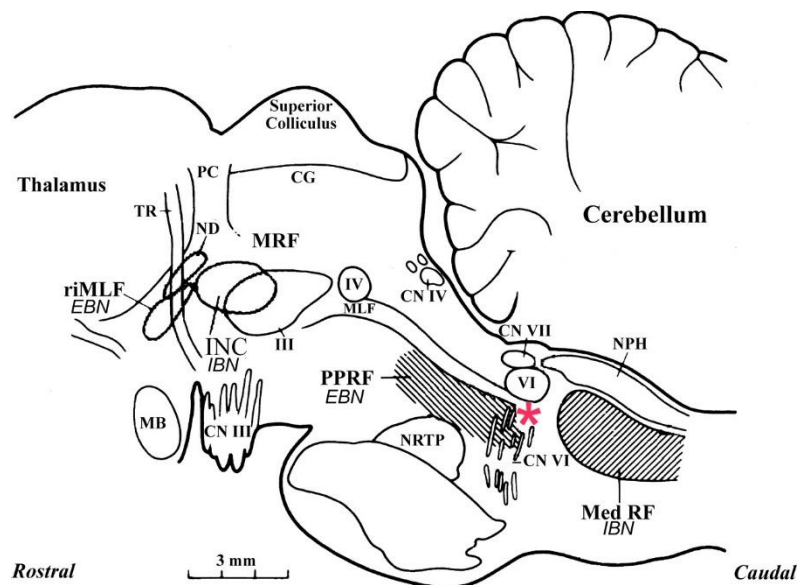
✓ **les neurones omnipauseurs** ou « *omnipause neurons* » (OPN)

✓ **les neurones phasiques du colliculus**

Récapitulatif des neurones impliqués dans les mouvements de saccades et leur localisation :

Nom	Direction	Localisation
Excitateurs (EBN)	Horizontale	Formation Réticulée Paramédiane du Pont (PPRF, <i>paramedian pontine reticular formation</i>) (Strassman et al. 1986a)
	Verticale	Noyau Rostral Interstitiel du Faisceau Longitudinal Médian (riMLF, <i>rostral interstitial nucleus of medial longitudinal fasciculus</i>) (Büttner-Ennever et Büttner 1978)
Inhibiteurs (IBN)	Horizontale	Formation Réticulée Médullaire (MedRF, <i>medullary Reticular Formation</i>) (Strassman et al. 1986b)
	Verticale	Noyau Rostral Interstitiel du Faisceau Longitudinal Médian (riMLF) et Noyaux Interstitiels de Cajal (NIC, <i>interstitial nucleus of Cajal</i>) (Horn et al. 2003)
Neurones Phasiques précoces (LLBN)	-	Noyaux Réticulaires Tegmentaux du Pont (NRTP, <i>nucleus reticularis tegmenti pontis</i>) (Kaneko, 2006).
Neurones Loquets (La)	-	Formation réticulée
Neurones Omnipauseurs (OPN)	-	Noyau Interstitiel du Raphé (NRI, <i>nucleus raphe interpositus</i>) (Büttner-Ennever et al. 1988).
Neurones phasiques du colliculus	-	Colliculus Supérieur (SC)

Concernant la réponse tonique, palier ou *step*, un intégrateur neuronal prendra en compte la commande de vitesse de la saccade (*pulse*) qui a servi à déplacer l'œil pour pouvoir le maintenir correctement en position de fixation en fin de saccade. Une fois de plus, dépendant de la direction du mouvement, les intégrateurs ne concerneront pas les mêmes structures : il s'agira du noyau périhypoglossal (NPH, *nucleus prepositus hypoglossi*) et du noyau vestibulaire médian (MVN, *medial vestibular nucleus*) pour les saccades horizontales (Langer et al. 1986, Belknap et McCrea 1988), et du noyau de Cajal (NIC, *interstitial nucleus of Cajal*) pour les saccades verticales (Crawford et al. 1991).



Localisation des structures du tronc cérébral responsables du contrôle des saccades. D'après Ramat et al., 2007, tiré du travail de Büttner- Ennever.

5.2.3. Les circuits des saccades horizontales et verticales

Les circuits neuronaux des saccades diffèrent selon le plan dans lequel le mouvement est effectué : nous présenterons d'abord les circuits neuronaux des saccades dans le plan horizontal puis ceux des saccades concernant le plan vertical.

Saccades horizontales

Neurones phasiques

Les neurones phasiques excitateurs (EBN) vont jouer un rôle majeur dans les mouvements de saccade vers la droite ou vers la gauche. Leur activité a été enregistrée 12 ms avant le début de la saccade ipsilatérale, et le nombre de potentiels d'action qu'ils vont émettre sera corrélé à l'amplitude du mouvement (van Gisbergen et al., 1981).

Les EBN envoient tout d'abord des afférences directes vers différentes structures responsables du mouvement binoculaire de même sens :

- ✓ Les motoneurones du noyau abducens ipsilatéral (VI), eux-mêmes liés au muscle droit latéral.
- ✓ Les interneurones du noyau VI, qui décussent par le faisceau longitudinal médian pour rejoindre le noyau III controlatéralement, lié au muscle droit médian controlatéral.

Ainsi, chaque EBN est relié ipsilatéralement au muscle droit latéral et controlatéralement au muscle droit médian, impliquant un mouvement de même sens pour les deux yeux, soit vers la droite, soit vers la gauche.

Les EBN projettent aussi sur les neurones inhibiteurs (IBN) ipsilatéraux, qui à leur tour vont projeter vers les EBN et IBN controlatéraux. La fonction principale des IBN étant d'inhiber l'activité des muscles antagonistes (le droit médian ipsilatéral et le droit latéral controlatéral) la loi d'innervation réciproque de Sherrington peut ainsi être respectée d'un point de vue des circuits neuronaux et l'ensemble des neurones phasiques excitateurs et inhibiteurs forme ainsi une boucle de rétroaction à latence courte.

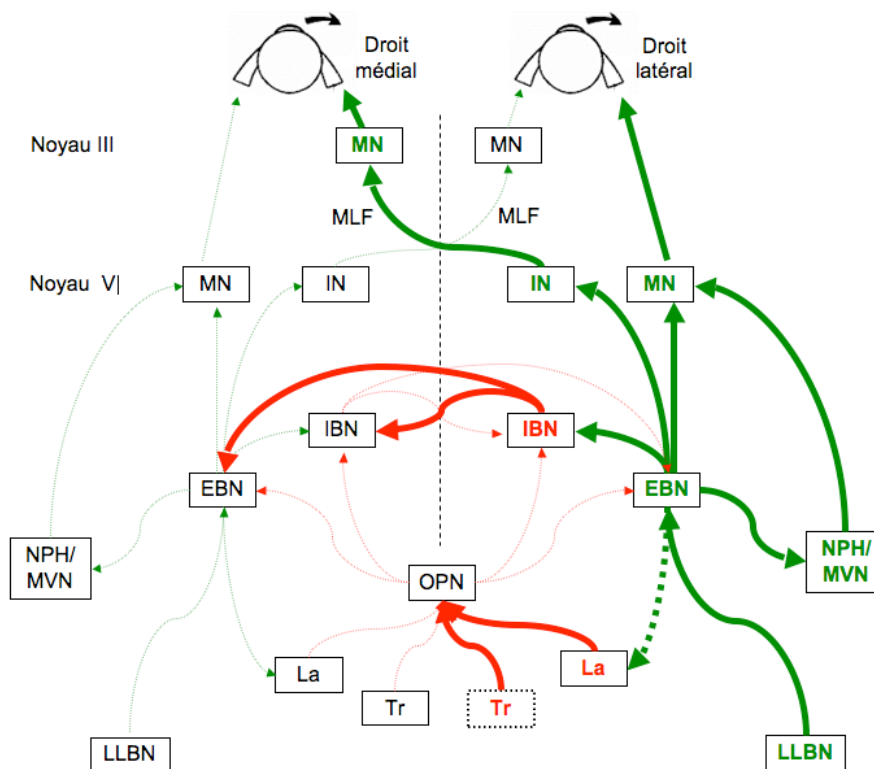
Les EBN projettent également sur les neurones des noyaux hyperglossal et vestibulaire médian (NPH/MVN), qui vont permettre l'intégration du signal à l'origine phasique en signal tonique (Cannon et Robinson, 1985), ainsi que vers les neurones loquets (La), qui eux-mêmes projettent vers les neurones omnipauseurs (OPN), silencieux pendant un mouvement de saccade (voir paragraphes d'après). Les EBN seraient potentiellement la source du silence des omnipauseurs par l'intermédiaire des neurones loquets durant une saccade.

Neurones phasiques précoces

L'activité des neurones phasiques précoces (LLBN) a été enregistrée 40 ms avant un mouvement de saccades (Kaneko, 2006). Leurs projections sont directes sur les EBN, mais se font aussi en direction de nombreuses autres structures comme les OPN, le NRTP, le cervelet ou la PPRF. Il est à noter qu'ils présentent des connexions réciproques avec le colliculus supérieur (SC). Ces diverses projections leur permettraient d'assurer différents rôles, comme celui du codage de la taille des saccades (liens avec NRTP) ou celui de la synchronisation du début et de la fin des saccades (liens avec OPN et EBN).

Neurones omnipauseurs

Ramat et al. (2005) ont montré que les OPN projettent directement à la fois sur les EBN et les IBN afin d'inhiber leur réponse, ce qui est confirmé par le fait que pendant une saccade, on ne relève pas d'activité chez eux. L'inhibition des OPN va donc permettre le mouvement. On retrouve cependant aussi une inactivité des OPN lors du maintien d'un angle de vergence fixe en vision proche (Busetini et Mays, 2003) ainsi que pendant le clignement des yeux (Hepp et al., 1989). L'activité des OPN aura par contre un rôle très important lorsque la fixation devra être maintenue, en inhibant l'action de l'ensemble des EBN et IBN (Ramat et al., 2005).



Structures neuronales impliquées dans un mouvement de saccade vers la droite. Les flèches rouges correspondent aux innervations inhibitrices, les flèches vertes aux innervations excitatrices. Lignes épaisses : noyau et neurones actifs lors du mouvement. Lignes pointillées : structures non identifiées. Le signal de déclenchement (Tr) serait à l'origine du silence des omnipauseurs (OPN), et ce silence serait maintenu pendant la saccade grâce aux neurones loquets (La), en lien avec les EBN. Les neurones phasiques précoces (LLBN) innervent les EBN situés dans la formation réticulée paramédiane du Pont (PPRF), qui eux projettent vers les IBN dans la formation réticulée médullaire (MedRF) ipsilatérale ainsi que vers les neurones des noyaux hyperglossal et vestibulaire médian (NPH/MVN). Ces structures projettent ensuite sur les motoneurones (MN) et interneurones (IN) du noyau abducens VI : les MN innervent le muscle droit latéral de l'œil droit et les IN innervent les MN du noyau oculomoteur III controlatéral en traversant le faisceau longitudinal médian (MLF). Les connexions de ces structures avec le colliculus supérieur n'ont pas été représentées. D'après Vernet (2009).

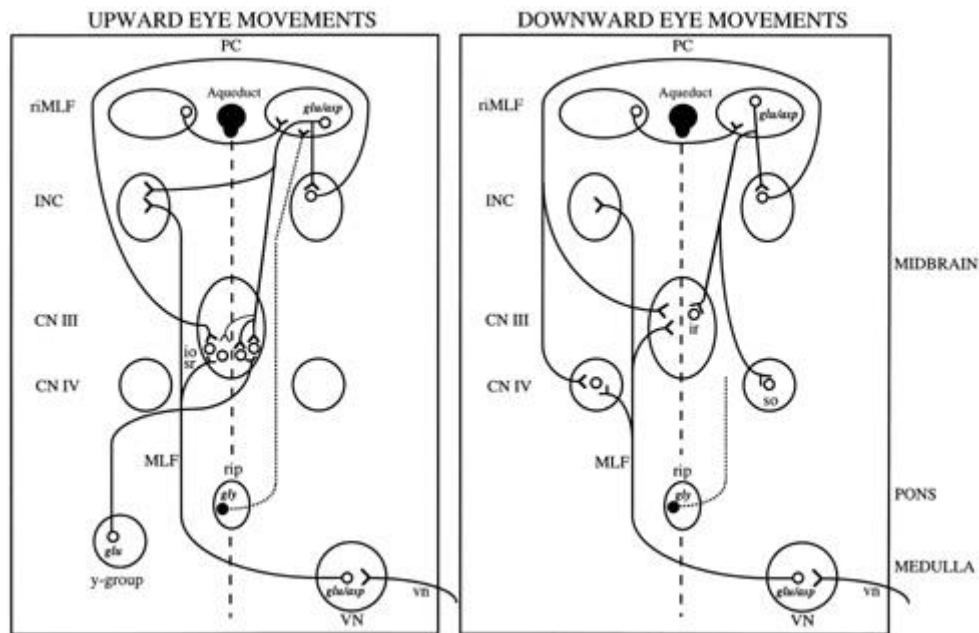
Saccades verticales

Concernant les mouvements dans le plan vertical (saccades vers le haut ou vers le bas), on retrouve une architecture de réseau neuronal similaire avec des EBN, issus cette fois du noyau rostral interstitiel du faisceau longitudinal médian (riMLF), qui projettent vers les noyaux oculomoteur (III) et trochléaire (IV). Cependant, leurs projections seront tour à tour bilatérales ou unilatérales, dépendant de la direction du mouvement.

Pour les saccades vers le bas, les EBN présentent des connexions ipsilatéralement vers les noyaux III et IV. Les motoneurones issus du III et impliqués dans ce mouvement innervent ensuite le muscle droit inférieur ipsilatéral, quand les motoneurones du IV innervent le muscle oblique supérieur controlatéral (Moschovakis et al., 1991b). Concernant les saccades vers le haut, les EBN responsables présentent cette fois des connexions bilatérales vers les noyaux III (Moschovakis et al. 1991a). Les motoneurones du III vont cette fois innerver les muscles droit supérieur et petit oblique ipsilatéraux.

De façon identique au système horizontal, les EBN présentent aussi des connexions avec des IBN, qui jusqu'à maintenant étaient localisés dans le riMLF. Cependant, de récentes études montrent que ces neurones seraient plutôt situés dans le noyau interstitiel de Cajal (NIC) et enverraient des projections directes aux motoneurones des noyaux III et IV controlatéraux (Horn, 2006). Une nouvelle boucle de rétroaction existerait donc aussi dans le plan vertical, du fait d'interactions probables entre ces neurones et les EBN.

Au même titre que pour les saccades horizontales, le NIC s'est révélé être une structure directement impliquée dans l'intégration des signaux de vitesse en signaux de position pour les mouvements verticaux. Le circuit neuronal des saccades verticales présente un fonctionnement similaire à celui des saccades horizontales, avec la présence des OPN qui inhibent les EBN et IBN. Leur inactivité permet de nouveau au mouvement de se déclencher, et il existe de la même façon une boucle de rétroaction par les neurones loquets (La) liés aux OPN et EPN. En amont, les LLBN, qui présentent des connexions avec les EBN et beaucoup d'autres structures, entament leur activité ici encore 40ms avant le début du mouvement.



Circuits neuronaux des commandes de saccades dans le plan vertical (vers le haut pour la figure de droite, vers le bas pour la figure de gauche). D'après Bhidayasiri et al., 2000.

5.2.4. Circuits corticaux et sous corticaux des saccades

Si une saccade est générée et déclenchée au niveau du tronc cérébral, de nombreuses aires corticales et sous corticales vont aussi être impliquées dans la réponse nécessaire au mouvement. En effet, ce mouvement est très souvent guidé grâce à la localisation de la future cible, qui est nécessaire pour déterminer la direction de la saccade. L'aspect volontaire d'une saccade fait aussi intervenir un degré de motivation et une modification dans la répartition des ressources attentionnelles. A contrario, une saccade peut aussi être réflexe. Toutes ces caractéristiques vont faire intervenir différentes régions corticales nécessaires à l'accomplissement d'un tel mouvement. Les travaux de l'équipe de Pierrot-Deseilligny ont permis l'isolation des aires corticales impliquées en fonction du type de saccade à accomplir, grâce notamment à des études utilisant la stimulation magnétique transcrânienne (TMS, *transcranial magnetic stimulation*) ou à des études d'imagerie chez les adultes sains (Pierrot-Deseilligny 1989, Pierrot-Deseilligny et al. 1995, Gaymard et al. 1998, Pierrot-Deseilligny et al. 2002, Pierrot-Deseilligny et al. 2004). Le lobe frontal, le lobe pariétal, certaines structures sous-corticales ainsi que le cervelet ont été isolés comme impliqués dans la mise en place des mouvements saccadiques.

5.2.5. Contribution du lobe frontal

Concernant le lobe frontal, les aires dont l'implication est majeure sont le champ oculomoteur frontal ou '*frontal eye field*' (FEF), le champ oculomoteur supplémentaire ou '*supplementary*

eye field' (SEF), le pré-champ oculomoteur supplémentaire ou '*pre-SEF*', le cortex préfrontal dorsolatéral ou '*dorsolateral prefrontal cortex*' (DLPFC), le champ oculomoteur cingulaire ou '*cingulate eye field*' (CEF), au sein du cortex cingulaire antérieur ou '*anterior cingulate cortex*' (ACC) et le cortex frontal dorsomédial ou '*dorsomedial frontal cortex*' (dmFC). Les travaux de Pierrot-Deseilligny et al. (1995) et de Leigh et Zee (2016) rapportent tout d'abord que 2 aires du lobe frontal sont impliquées dans le déclenchement des saccades : le FEF et le SEF.

Le FEF, situé à l'intersection entre le sillon frontal supérieur et le sillon précentral, est l'aire oculomotrice principale (Lobel et al., 2001). Il est impliqué dans la préparation et le déclenchement des saccades volontaires, de saccades de mémoire, de saccades prédictives ou d'anti-saccades, et moins utile pour le déclenchement de saccades réflexes (Pierrot-Deseilligny et al. 1991b, Rivaud et al. 1994, Guitton et al. 1985, Müri et al. 1991). En effet, cette aire corticale est responsable de la sélection de la cible lors d'une saccade, mais possède aussi un rôle dans l'aspect décisionnel du mouvement, dans son initiation et dans la transformation du signal en commande motrice (Gaymard et al., 2012). La zone allouée aux saccades se situe dans la partie supérieure de la paroi antérieure du sillon précentral (Rosano et al., 2002). Le FEF reçoit des afférences du cortex préfrontal, du PEF, du SEF (Schall et al. 1993) et projette directement vers le pont et vers le Colliculus supérieur (Stanton et al. 1988, Segraves 1992). Ces deux chemins permettraient le contrôle des saccades volontaires mais aussi des saccades réflexes, de par le rôle de désengagement de la fixation (Rivaud et al., 1994). Le FEF présente aussi des projections indirectes, via les ganglions de la base (GB), vers le Colliculus supérieur. Cette dernière voie formerait un réseau cortico-sous-cortical spécialisé dans la mémorisation active de la cible lors d'une tâche de saccades de mémoire. Cependant, ce réseau, insuffisant en l'état, serait suppléé par d'autres aires comme le dlPFC, le cortex parahypocampique et la formation hippocampique, qui s'attacheraient à maintenir l'information spatiale précise pendant la période de mémorisation (Pierrot-Deseilligny et al. 2002). Outre le déclenchement d'une saccade, le FEF joue un rôle plus particulièrement dans la précision des saccades volontaires visuellement guidées (rétinotopiques) ainsi que des saccades réflexes controlatérales, mais aussi dans le désengagement de la fixation. Son activité est donc majeure pendant des tâches comme le paradigme *overlap* mais assez mineure pendant des tâches comme le paradigme *gap*.

Le SEF représente la deuxième aire du lobe frontal extrêmement impliquée dans les mouvements de saccades, et est située à la surface médiale du gyrus frontal supérieur

(Grosbras et al., 1999). Pierrot-Deseilligny et al. ont montré son implication dans la programmation motrice lors d'un enchaînement de saccades successives, en combinant plusieurs saccades, ou en coordonnant des saccades volontaires avec d'autres mouvements de la tête ou du corps (2003), utilisant un codage de type craniotopique, voir spatiotopique (Schall et al. 1993) et pas rétinotopique comme le FEF. Il présente des projections directes vers les formations réticulaires, ainsi que vers le FEF, le noyau caudé et le Colliculus supérieur (Luppino et al., 2003).

Le cortex cingulaire fait lui aussi partie intégrante du circuit, et présente en son sein une aire oculomotrice : le champ oculomoteur cingulaire (CEF), fortement connecté à toutes les aires motrices oculaires frontales et au tronc cérébral (Paus, 2001). En effet, des études réalisées à l'aide de l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) ont montré l'activation de la partie postérieure de l'ACC, située à la délimitation entre l'aire 24 de Brodmann, correspondant au cortex cingulaire antérieur (ACC), et l'aire 23 de Brodmann, correspondant au cortex cingulaire postérieur (PCC), lors de saccades volontaires, de tâche d'anti-saccades ou encore de saccades de mémoire (Anderson et al. 1994, Dorrichiet al. 1997, Ford et al. 2005, Heide et al. 2001). L'hypothèse de Pierrot-Deseilligny et al. (2003) veut que le CEF serve à faciliter le déclenchement des saccades volontaires en rehaussant l'activité des aires motrices impliquées. La possibilité qu'il ait un rôle de modulateur motivationnel pour l'ensemble des saccades volontaires a aussi été avancée (Gaymard et al. 1998, Paus 2001). De nombreuses connexions entre l'ACC, le cortex préfrontal dorso-latéral (DLPFC) et le cortex parahypocampal ont mis en lumière un réseau impliqué dans la mémorisation et la transmission d'informations vers les aires motrices concernées.

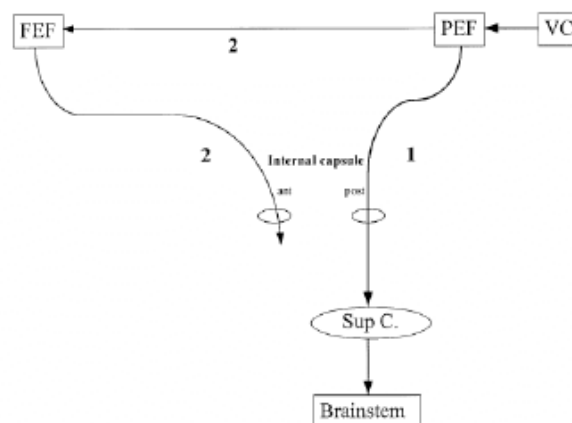
Le cortex préfrontal dorso-latéral (DLPFC) est fortement impliqué dans la prise de décision du déclenchement du mouvement de saccade : inhibition des saccades réflexes lors du paradigme anti-saccade (Pierrot-Deseilligny et al. 2003), mémorisation d'informations de localisation de futures saccades potentielles (Sakai et al., 2002) ou encore facilitation de saccades anticipées volontaires, dépendant des circonstances de la tâche et des consignes (Pierrot-Deseilligny et al. 2004). Le rôle du DLPFC paraît similaire d'un point de vue moteur à celui qu'on lui prête sur le mécanisme d'inhibition et la modulation des réponses exécutives de façon plus générale. En effet, il intervient aussi dans les opérations cognitives de haut niveau pendant lesquelles il lui est attribué une fonction de contrôle du timing des activités neuronales lors de tâches complexes où la prise de décision est indispensable (Constantinidis

et al., 2002). L'implication de l'ACC et du DLPFC dans certains processus cognitifs de haut niveau fera l'objet d'une présentation approfondie en partie XX.

5.2.6. Contribution du lobe pariétal

Concernant les lobes pariétaux, il s'agit du champ oculomoteur pariétal (ou '*parietal eye field*', PEF) et plus généralement du cortex pariétal postérieur (ou '*parietal posterior cortex*', PPC), bien que la région supérieure du cortex pariétal et le cortex vestibulaire puissent influencer eux aussi les mouvements de saccade (Leigh et Zee, 2016).

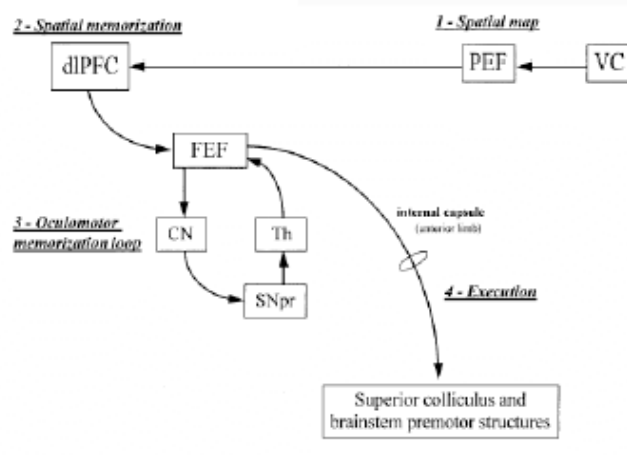
Le PEF va avant tout jouer un rôle dans le déclenchement des saccades réflexes liées à l'apparition brutale d'un stimulus visuel dans le champ visuel (Pierrot-Deseilligny et al. 2003 ; Rivaud et al., 1994 ; Braun et al., 1992). En intégrant les données spatiales provenant du cortex visuel, il génère un signal moteur envoyé directement au colliculus supérieur via la branche postérieure de la capsule interne. Ainsi, ses projections sur le FEF ne sont pas utilisées et la réponse peut se faire de manière très rapide (voir voie 1, Figure XX). Cependant, plus les cibles seraient prédictibles, plus cette voie serait abandonnée au profit des connexions que présentent le PEF avec le lobe frontal et le FEF (voir voie 2, Figure XX). Cette même voie serait aussi utilisée en cas de saccades de mémoire.



Régions corticales et sous corticales hypothétiques impliquées dans le contrôle des saccades réflexes. VC : Cortex visuel ; PEF : champ oculomoteur pariétal ; FEF : champ oculomoteur frontal. Sup C : Colliculus supérieur. D'après Gaymard et al., 1998.

Le PEF sera aussi impliqué dans le désengagement de la fixation (Pierrot-Deseilligny et al. 1995), des études montrant qu'une lésion en son sein ou l'application d'une TMS (Tzelepi et al., 2005) avaient le même effet : l'augmentation de la latence des mouvements de saccade.

Il sera donc lui aussi impliqué dans la précision des saccades controlatérales visuellement guidées ou mémorisées (Pierrot-Deseilligny et al., 1991b). Concernant ces dernières, la mémorisation spatiale se fera grâce à un réseau comprenant le DLPFC, présentant des afférences avec le PEF, le FEF, le noyau caudé (GB), le Thalamus et la substance noire réticulée (voir Figure XX). Ce réseau maintiendra en interne le signal moteur et sera sollicité au moment du déclenchement de la saccade en l'envoyant vers le tronc cérébral, de façon directe ou relayé par le Colliculus supérieur.



Réseau impliqué dans le contrôle des saccades de mémoire. D’après Gaymard et al., 1998.

En outre, le PEF sera directement impliqué dans les processus d’attention visuo-spatiale ainsi que dans la transformation des stimuli visuels en composantes motrices (Müri et al., 1996 ; Gaymard et al., 1998).

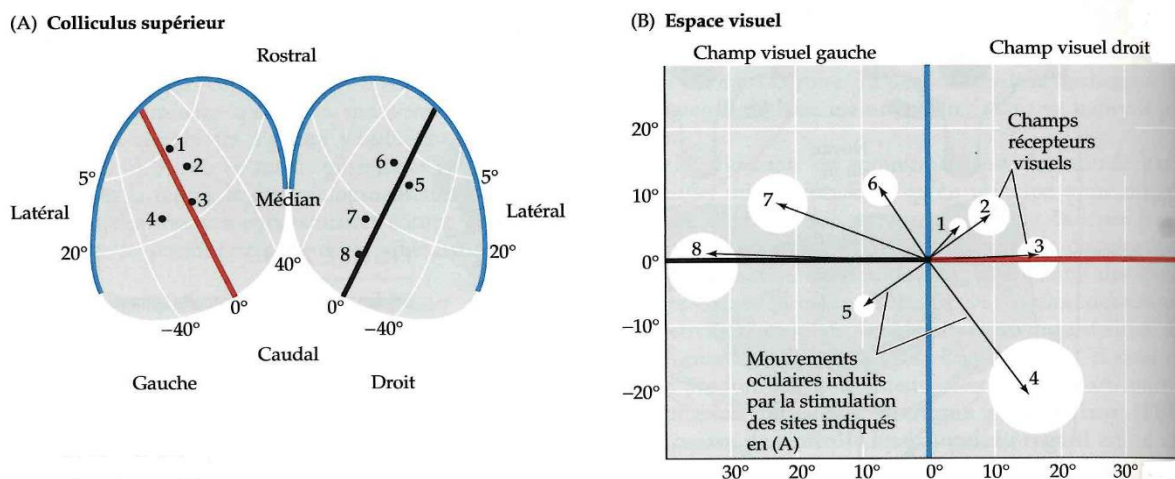
Le PPC, lui, va jouer un rôle majeur dans l’intégration visuospatiale des signaux (Pierrot-Deseilligny et al. 1995) concernant la saccade. Cependant, il a été montré chez lui un fonctionnement particulier et asymétrique. Sa partie droite sera surtout impliquée dans le désengagement de la fixation (Pierrot-Deseilligny et al. 2002 ; Kapoula et al., 2001). Des études utilisant la TMS ont en effet montré un temps de latence allongé dans le déclenchement des mouvements oculaires en général. Ce désengagement serait nécessaire à l’initiation de tout autre mouvement. La partie gauche du PPC est impliquée dans l’initiation du mouvement oculaire ainsi que dans le codage de la localisation de la cible au niveau du champ visuel (Pierrot-Deseilligny et al. 2002 ; Vernet et al., 2008 ; Kapoula et al. 2001 ; Kapoula et al. 2004 ; Yang et Kapoula, 2004). Ce codage permettrait le déclenchement des

mouvements oculaires vers des cibles dont la situation aura été préalablement et correctement localisée.

5.2.7. Aires sous-corticales

Au niveau sous cortical, le Colliculus supérieur (SC), les ganglions de la base (BG) et le thalamus sont les principales structures impliquées elles aussi dans le déclenchement et le contrôle des saccades.

Comme indiqué plus haut, la plupart des aires corticales impliquées dans les mouvements de saccade sont en connexion, directe ou indirecte, avec le Colliculus supérieur. Celui-ci va donc avoir un rôle central dans le lien entre différentes aires, en particulier le FEF et le PEF, et les neurones effecteurs du tronc cérébral pendant une saccade. Formé d'une succession de 7 couches (Sparks et Nelson, 1987 ; Isa et Hall 2009), le SC est situé dans la partie supérieur du tronc cérébral. Ses couches superficielles reçoivent des afférences visuelles directes des cellules ganglionnaires provenant de la rétine. Elles vont permettre une cartographie détaillée et ordonnée topographiquement du champ visuel entier : chaque site de cette couche sera activé de façon maximale par la présence d'un stimulus à l'intérieur de la zone du champ visuel qui lui est alloué (Schiller et Stryker, 1972).



Représentation simplifiée de la carte motrice générant les mouvements oculaires (B) concordant avec la carte sensorielle de l'espace visuel dans le Colliculus supérieur (A). Des micro-stimulations ont été appliquées sur les différents sites localisés par des chiffres en A. Les champs récepteurs de ces sites ont été retrouvés en B, la stimulation ayant induit des saccades oculaires dans des directions bien spécifiques, attestant de l'organisation topographique des données visuelles dans les couches supérieures du SC. D'après Schiller et Stryker (1987), tiré de Purves et al. (2015).

Les couches plus profondes du SC vont, elles, avoir un rôle dans l'élaboration de la commande motrice associée à la partie du champ visuel correspondant au niveau de la carte rétinotopique des couches superficielles. Cependant, le message envoyé définira les objectifs du mouvement et non la commande motrice en elle-même, vers un emplacement déterminé (Optican, 2005). En effet, certains neurones vont permettre de coder spatialement en amont la direction et l'amplitude des mouvements de saccade (Sparks et Nelson, 1987 ; Sparks et Porter, 1983). D'autres neurones issus des couches motrices vont permettre eux aussi la localisation et la préparation de la saccade (« *build-up neurons* »), et seront relayés par des neurones phasiques dont l'activité sera enregistrée juste avant le début d'un mouvement, quand la cible sera localisée dans leur champ correspondant (Munoz et Wurtz, 1995, Ma et al., 1991). L'activité au sein du pôle rostral du SC concernera surtout les fixations et les saccades de faible amplitude, quand le pôle caudal sera lui impliqué dans l'initiation des mouvements des yeux, en lien ou pas avec des mouvements de la tête. Le rôle précis du SC serait donc l'initiation des saccades en produisant un premier signal en direction des EBN, OPN mais aussi du cervelet. Malgré tout, il ne serait pas la seule structure impliquée étant donné l'activité similaire du FEF à cet effet. L'exécution de la saccade et le fait d'amener exactement les yeux sur la cible relèverait cependant plus de l'activité de la formation réticulée et du cervelet. La localisation, la sélection de la cible et l'initiation de la saccade sont donc des tâches qu'il est possible de lui incomber, cependant le reste du mouvement paraît plus être sous contrôle d'autres structures (Aizawa et Wurtz, 1998 ; Soetedjo et al., 2002 ; Scudder et al., 2002).

Les ganglions de la base (BG) regroupent en réalité trois structures différentes impliquées dans les mouvements de saccades : le noyau caudé (CN), la substance noire pars reticulata (SNpr) et le noyau sous-thalamique (STN). Relais de la seconde voie efférente partant du FEF jusqu'au SC ayant pour rôle majoritaire la sélection de cibles avec récompense à la clef, les BG vont être impliqués dans les mouvements oculaires en lien avec des processus cognitifs de haut niveau (motivation, mémoire de travail). Les travaux d'Hikosaka et Wurtz (1983) ont permis de faire la lumière sur leur fonctionnement et les mécanismes impliqués. D'ordre général, la SNpr maintient une action tonique inhibitrice sur les neurones phasiques colliculaires (relais nigro-colliculaire, tonique 298-299-301 Hikosaka et Wurtz, 1983), impliqués donc dans l'initiation d'une saccade (voir plus haut). Cette inhibition peut être levée par un premier relais entre le CN et la SNpr, inhibiteur lui aussi (relais caudo-nigral, phasique, Shimo et Hikosaka, 2001 649). Un dernier relais, subthalamo-nigral, est lui

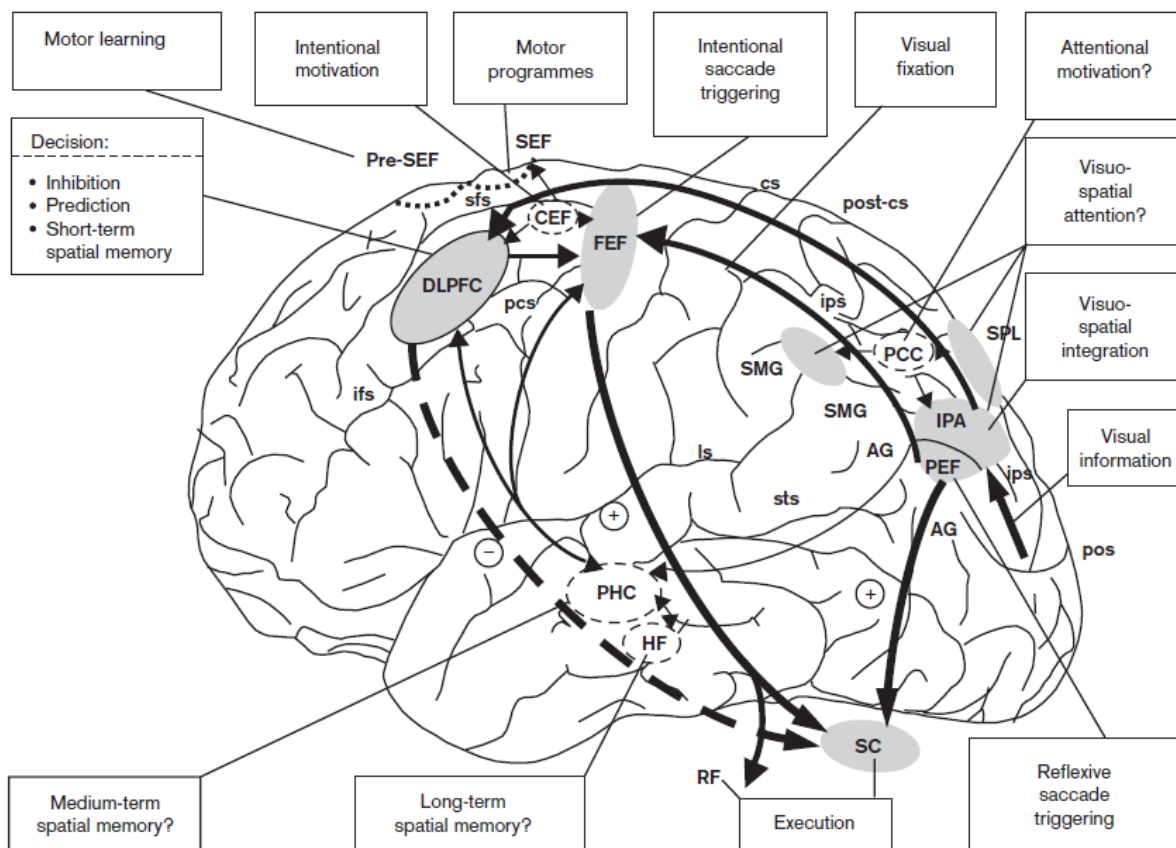
excitateur. Etant donné leur lien avec les champs oculomoteurs corticaux, les BG sont majoritairement impliqués dans le contrôle de mouvements oculaires volontaires (Gaymard et al., 2012) et permettraient la facilitation de l'initiation des saccades dans certains contextes particuliers : préalablement entraînées, prédictives, mémorisées ou encore réalisées avec récompense à la clef. De la même façon, mais concernant cette fois la fixation, les BG pourraient aussi être responsables de l'inhibition de saccades réflexes non utiles dans ces circonstances.

Certaines structures du Thalamus, plus particulièrement la lamina médullaire interne (IML, '*internal medullary lamina*'), le pulvinar et les noyaux central, ventro-latéral et médio-dorsal. L'IML reçoit des afférences de plusieurs structures comme le SC et le tronc cérébral, mais projette uniquement vers le cortex et les BG. Ces connexions suggèrent que le rôle de l'IML pourrait être d'apporter une copie efférente du mouvement depuis le tronc cérébral vers les champs oculomoteurs corticaux (Schalg-Rey et Schalg, 1989 ; Sommer et Wurtz, 2004). Concernant le Pulvinar, sa partie inféro-latérale serait impliquée dans la suppression des saccades, alors que sa partie dorso-médiale jouerait un grand rôle dans la direction (Kastner et al., 2004) et le déplacement de l'attention visuelle (Benevento et Port, 1995 ; Olshausen et al., 1993 ; Robinson, 1993). Ces deux parties du Pulvinar présentent de fortes connexions avec PPC, lui aussi très impliqué dans le phénomène d'attention endogène. Les noyaux médio-dorsal et ventrolatéral vont servir majoritairement de relais : entre le signal du SC et le cortex préfrontal pour le premier (Bellebaum et al., 2005) et entre le cervelet et le cortex cérébral pour le second (Tanaka 2006).

5.2.8. Contribution du cervelet

Le cervelet est la dernière structure d'importance pour les mouvements de saccades. Il va permettre une meilleure précision des saccades avec la possibilité de corriger leur trajectoire très rapidement après le déclenchement du mouvement (Leigh et Zee, 2016), et ce à l'aide de deux de ses structures majoritairement impliquées : le vermis dorsal et le noyau fastigial. Des enregistrements ont montré que les cellules de Purkinje du vermis entraînent en activité 15 ms avant le début de saccade (Ohtsuka et Noda, 1991). Il est impliqué dans les mouvements de saccades ipsilatérales, et le fait que ces cellules répondent selon une direction précise témoigne d'une organisation topographique évidente au sein de cette structure (Noda et Fujikado, 1987). Les neurones du noyau fastigial démarrent, eux, leur activité 8ms avant le

début d'une saccade controlatérale et vers la fin d'une saccade ipsilatérale (Ohtsuka et Noda, 1991 ; Helmchen et al., 2003). Le vermis dorsal et le noyau fastigial reçoivent des projections de la majorité des différents champs oculomoteurs cités plus haut via les noyaux pontiques, premiers relais majeurs de la commande saccadique. Grâce à cette organisation, le noyau fastigial et plus particulièrement le vermis dorsal du cervelet reçoivent ainsi un signal neural représentant directement le changement désiré de position des yeux. En relation à cela, le signal initiatique provenant du SC va provoquer le mouvement, dont la copie éfférente va être transmise via le NRTP au vermis dorsal ainsi qu'au noyau fastigial (Noda et al., 1990). Ce dernier reçoit aussi des projections du vermis dorsal, et projette lui-même vers différentes structures comme le tronc cérébral (plus particulièrement les EBN, IBN et OPN), le thalamus, le SC et la formation réticulée mésencéphalique (May et al., 1990). Ainsi, le noyau fastigial sera la structure chargée de la comparaison de ces deux signaux pour former un potentiel message moteur d'erreur qui permettra l'arrêt approprié du mouvement sur la cible (Leigh et Zee, 2016).



Aires corticales et sous corticales et leur implication dans les différents types de saccades oculaires. PEF : champ oculomoteur pariétal. PCC : cortex pariétal postérieur. DLPFC : cortex préfrontal dorso-latéral. FEF : champ oculomoteur frontal. SEF : champ

oculomoteur supplémentaire. HF : formation hippocampique. PHC : cortex parahypocampal. T : thalamus. SC : Colliculus supérieur. RF formations réticulées. AG : Gyrus angulaire. IPA : aire intra-pariétal. PCC : cortex cingulaire postérieur. CEF : champ oculomoteur cingulaire. sfs, superior frontal sulcus; cs, central sulcus; pcs, precentral sulcus; ips, intraparietal sulcus; ifs, inferior frontal sulcus; SMG, supramarginal gyrus; SPL, superior parietal lobule; ls, lateral sulcus; sts, superior temporal sulcus; pos, parieto-occipital sulcus; D'après Pierrot-Deseilligny et al., 2004.

CHAPITRE 6 : Saccade, vergence et accommodation, une interaction constante

Les mouvements de saccades permettent la fovéation d'une cible périphérique, les mouvements de vergence permettent eux de maintenir la vision simple d'objets dans la profondeur, alors que l'accommodation permet de faire la mise au point de l'image. Or, si la fixation change entre des cibles se trouvant à la fois à des distances et des directions différentes, comme c'est constamment le cas dans la vie de tous les jours, les mouvements de vergence et de saccade seront dès lors combinés. Si l'interaction accommodation/vergence a déjà été abordée en détail, il est désormais indispensable de nous focaliser sur les interactions entre ces deux fonctions et les saccades, afin de comprendre la coordination binoculaire des saccades qui est essentielle par exemple lors de la lecture. Nous présenterons par la suite les différents travaux faisant le lien entre dysfonctionnements A-V tels qu'ils sont diagnostiqués au niveau clinique et problèmes de motricité.

Si les aires corticales impliquées dans la programmation des saccades et des vergences sont très similaires, l'exécution des mouvements en eux-mêmes restent très différents sur plusieurs aspects, comme pour leur vitesse par exemple. Nous avons observé que les stimuli qui les déclenchaient n'étaient pas de même nature, et que les circuits corticaux impliqués dans leur accomplissement n'étaient que partiellement similaires. De ce fait, la distinction entre deux systèmes de contrôle, l'un saccadique et l'autre de vergence, se doit d'être abordée plus en profondeur lorsque ces deux mouvements entrent en interaction. Le contrôle des mouvements saccadiques est de ce fait sujet à débat depuis la fin du XIX^{ème} siècle, avec deux grandes théories s'affrontant encore aujourd'hui : celle de Hering (rééditée en 1977) et celle de Helmholtz (1924-1925). L'étude des mouvements dits combinés de saccade et vergence a permis depuis cette époque d'apporter des arguments à l'une ou à l'autre théorie. Il apparaît cependant aujourd'hui encore qu'on ne puisse définitivement en entériner une.

Le modèle de vision binoculaire selon Hering (1977) est basé sur le concept d'un œil cyclope fictif qui serait placé exactement entre les globes et qui simplifierait l'explication de la coordination des mouvements. Cet « organe » réunirait ainsi les deux yeux, pour qui une même commande nerveuse centrale serait distribuée de manière égale aux muscles, d'actions

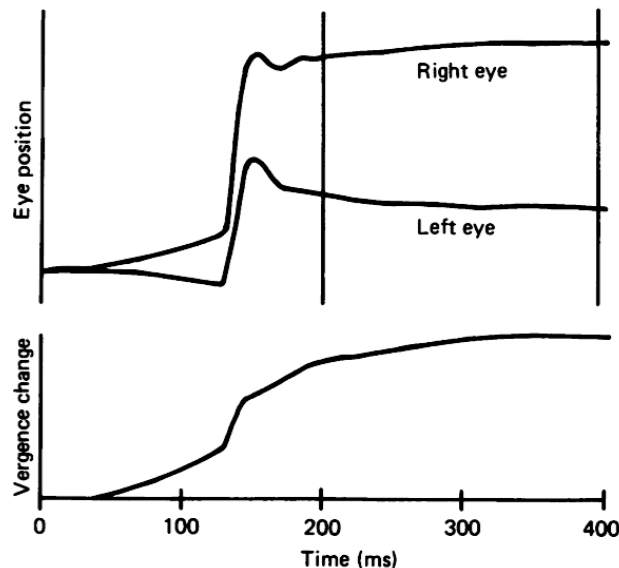
agonistes pour les mouvements de saccades et d'actions antagonistes pour les mouvements de vergence, et permettrait ainsi aux deux globes oculaires une rotation d'amplitude appropriée. La simultanéité de l'envoi du message nerveux aux deux branches distinctes serait à l'origine de la bonne coordination du mouvement, qui dans ce modèle apparaît donc innée. Dans le cas de mouvements combinés, deux commandes, l'une de vergence et l'autre de saccade, seraient associables et exécutées en parallèle. Leur association résulterait en une inégalité de l'amplitude finale des mouvements entre les deux yeux ; en effet, la vergence faisant bouger les yeux dans des directions opposées, la saccade est agrandie pour un œil et diminuée pour l'autre.

Selon Helmholtz (1924-1925) au contraire, les deux yeux reçoivent plutôt des commandes indépendantes et qui peuvent de ce fait différer en cas de mouvements combinés, ce qui serait à l'origine d'une rotation plus importante d'un œil par rapport à l'autre. La coordination ne serait donc pas innée pour lui, nécessiterait une expérience et résulterait donc d'un apprentissage. Grâce au paradigme de Müller, il est possible de mieux apprécier la différence entre ces deux théories : dans ce paradigme, le sujet doit réaliser un mouvement combiné de vergence et de saccade entre deux points distincts, ces deux points étant cependant alignés pour un seul des deux yeux. La théorie de Hering décompose le mouvement total en deux composantes provenant de deux systèmes distincts, alors que la théorie de Helmholtz plaide pour le déplacement d'un seul des deux yeux.



Représentation des hypothèses de Hering (1) et de Helmholtz (2) grâce au paradigme de Müller, déplacement du regard du point A au point B. Dans le premier cas, le couple oculaire reçoit 2 innervations : une pour le déplacement en convergence et une pour le déplacement conjugué vers la droite. Dans le deuxième cas, seul l'œil gauche reçoit une commande de déplacement vers la droite.

Les travaux précurseurs de Yarbus (1957, 1967), concernant un mouvement combiné tel qu'il est décrit dans la Figure précédente, ont permis d'apprécier les mouvements exacts réalisés par chaque œil. L'auteur avance dès lors qu'un mouvement combiné est la résultante d'un déplacement en trois phases : un mouvement de vergence lent suivi d'un mouvement de saccade rapide et terminé par un dernier mouvement de vergence lent. Cette hypothèse est en adéquation avec la théorie de Hering, malgré la nuance du processus séquentiel décrit. Enright (1984) est revenu sur ce développement en approfondissant l'analyse exacte des mouvements réalisés : il insiste alors sur le fait que le mouvement de vergence est majoritairement effectué pendant la saccade et est significativement accéléré. Dès lors, l'hypothèse triphasique de Yarbus n'est pas confirmée, et l'auteur plaide que les mouvements de vergence et de saccade ne seraient pas véritablement additionnés en un seul mouvement combiné mais qu'ils interagissent entre eux.



Tracé des trajectoires des deux yeux pendant un mouvement combiné saccade/vergence (graphique du haut) enregistré par Yarbus (1957). La variation de la valeur de l'angle de vergence en fonction du temps est représentée sur le graphique du bas. Source : Enright (1984).

Erkelens et al. (1989) ont reporté de leur côté que sur de grandes variations de direction (45° d'excentricité), une différence se faisait dans l'accomplissement de la divergence par rapport à la convergence pendant la saccade : le mouvement de divergence était en grande majorité (95%) accompli à la fin de la saccade, ce qui différait du mouvement de convergence (75%). Plus tard, Collewyn et al. (1995) sont venus confirmer eux aussi les constatations d'Enright concernant l'augmentation de la vitesse d'accomplissement et la plus courte durée du mouvement de vergence lorsqu'il était combiné à une saccade. Réciproquement, la latence du

mouvement de saccade est allongée et sa vitesse est diminuée. Bien que toutes ces données comportementales soient en faveur de la théorie de Hering, Enright a cependant émis une réserve concernant l'inégalité des saccades des deux yeux lors des mouvements combinés. Malgré cela, les différents auteurs cités se retrouvent sur un point majoritaire : la dynamique des mouvements de saccades et de vergence est modifiée en comparaison aux mouvements lorsqu'ils sont effectués de façon pure. Les études réalisées par la suite, que cela soit au niveau comportemental ou neurophysiologique, se sont focalisées sur la modélisation du mouvement combiné décrite par Yarbus. Deux grandes hypothèses ont dès lors été explorées, l'une prenant le parti de Hering quand l'autre prenait celui de Helmholtz. De ces recherches ont découlé plusieurs modèles de contrôle des mouvements de saccade et vergence distincts, qu'il nous est important de présenter en vue de l'étude de l'implication de la qualité de la vergence dans la motricité binoculaire.

6.1. Modèles de coordination binoculaire

La première hypothèse, plus en accord avec la théorie de Hering, veut que les mouvements de saccade et de vergence soient générés par deux systèmes corticaux distincts. L'interaction entre ces deux systèmes lors de mouvements combinés se ferait de façon non linéaire, ce qui expliquerait l'accélération de la composante de vergence pendant la saccade, et les neurones omnipauseurs (OPN) joueraient un rôle central dans la liaison des signaux de saccades et de vergence (Zee et al., 1992 ; Ramat et al., 1999 ; Kumar et al., 2006). Sur cette base, Zee et al. (1992) ont proposé plusieurs modèles, dont l'un a été repris et perfectionné plus tard par Busetini et Mays (2005b).

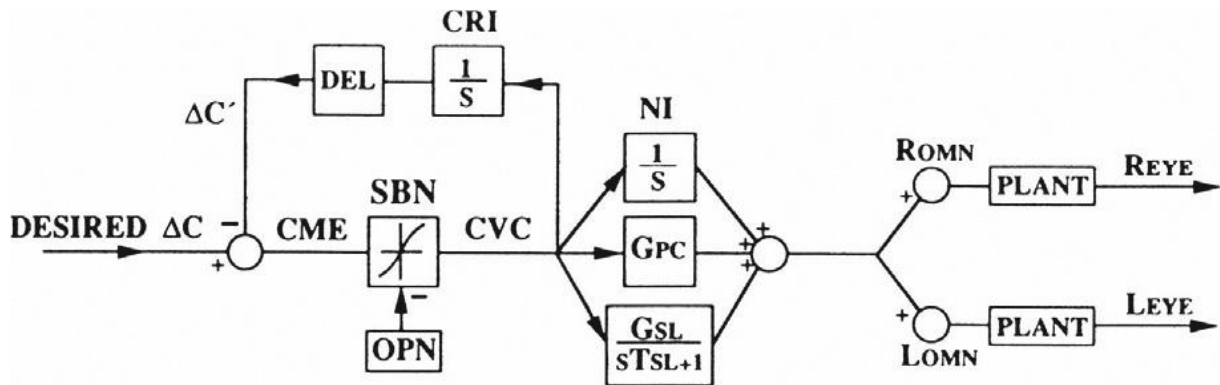
6.1.1. Modèles de Zee et al. (1992)

Les auteurs ont d'abord présenté deux premiers modèles, l'un concernant le contrôle des saccades pures et l'autre concernant le contrôle des mouvements de vergence pure.

Modèle de contrôle des saccades pures

Inspiré du contrôle rétroactif local développé par Robinson (1975), ce modèle se base sur l'existence d'une commande d'erreur motrice (CME), correspondant à la différence entre la position de l'œil désirée (ΔC) et la position actuelle de l'œil ($\Delta C'$). Cette commande d'erreur va actionner les neurones *burst* du tronc cérébral (SBN) pour produire la commande de vitesse non linéaire correcte (CVC). Cette commande, multipliée par un gain (Gpc), représentera le signal *pulse* envoyé aux motoneurones de saccades. En parallèle, cette commande est intégrée par un intégrateur neural (NI) pour produire la réponse *step* et est aussi

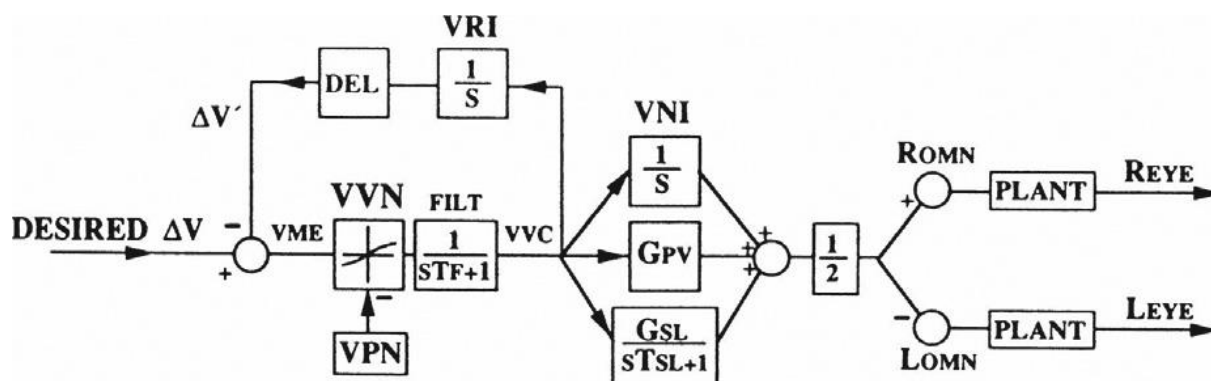
modulée au travers d'un filtre mêlant gain (Gsl) et constante de temps (Tsl) pour produire la réponse *slide*. Ces trois commandes sont ensuite envoyées aux motoneurones des nerfs III et VI pour le déclenchement du mouvement. Un rétrocontrôle de la commande conjuguée (CVC) existe via un intégrateur (CRI), et les neurones omnipauseurs (OPN) contrôlent l'activité des neurones *burst* via une inhibition tonique. C'est donc lorsque les OPN sont inhibés que la saccade peut être initiée et accomplie.



Modèle de contrôle de saccade, d'après Zee et al., 1992.

Modèle de contrôle des vergences pures :

Basé sur des résultats expérimentaux mais similaires en de nombreux points au modèle de contrôle des saccades, c'est ici un changement désiré de l'angle de vergence (ΔV) qui sera comparé à la copie efférente du changement voulu d'angle de vergence ($\Delta V'$) qui créera la commande d'erreur motrice (VME). Cette commande sera transmise aux neurones de vitesse de vergence (VVN) ou neurones prémoteurs. Ces derniers produiront une nouvelle commande de vitesse de vergence (VVC), qui sera au préalable filtrée (FILT) via une constante de temps spécifique pour la convergence (0.01) ou la divergence (0.05). Cette commande pourra en parallèle être soit sommée à un gain (Gpc, commande *pulse*), soit intégrée par un intégrateur neural (NI, commande *step*), soit modulée au travers d'un filtre (gain et constante de temps, Gsl et Tsl ; commande *slide*). Ces trois commandes vont ensuite voir leur part se diviser en deux pour innervé de façon équivalente les motoneurones des nerfs III et VI et déclencher le mouvement. Ici encore, ces neurones prémoteurs seront sous contrôle des neurones omnipauseurs de vergence (VPN), et le mouvement ne pourra être réalisé que lorsque ces derniers seront inhibés.

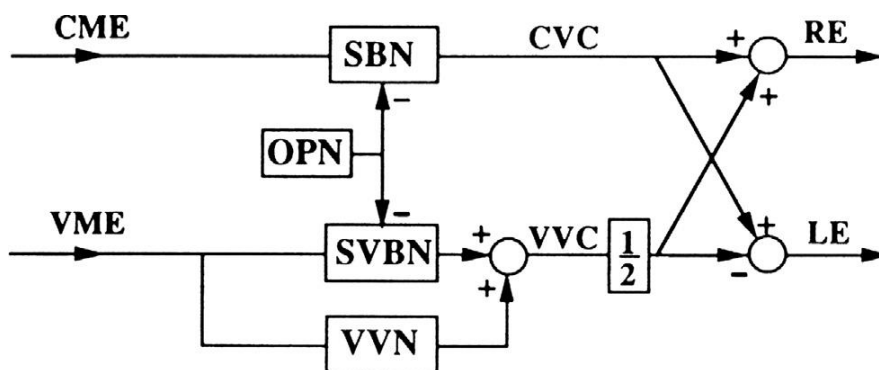


Modèle de contrôle de vergence, d'après Zee et al., 1992.

A partir de ces deux modèles, Zee et al. (1992) ont proposé que l'interaction entre saccade et vergence pouvait d'abord se faire au niveau prémoteur afin de tenter d'expliquer pourquoi la vergence était facilitée pendant un mouvement combiné. Cette accélération est en effet retrouvée lors de mouvement de vergence combinés à des saccades horizontales et verticales, faisant appel à des muscles différents pour ces dernières. Ils ont donc proposé deux autres modèles de mouvements combinés, en plaçant en parallèle les deux premiers présentés et distincts. Leurs modèles se basent ici majoritairement sur l'action des neurones omnipauseurs (OPN).

Le modèle SVBN

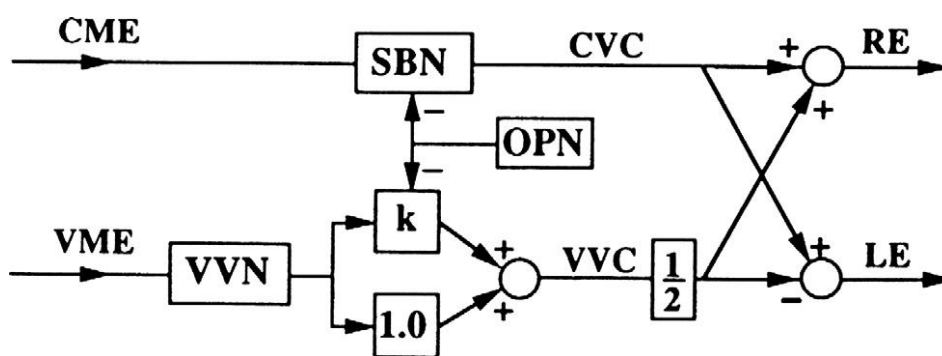
Dans ce modèle, les auteurs supposent l'existence de trois types différents de neurones phasiques : certains impliqués dans les saccades pures (SBN), certains impliqués dans les vergences pures (VFN) et un troisième type impliqué dans les mouvements de vergence uniquement lorsqu'ils sont combinés à des mouvements de saccade (SVBN). Les auteurs se basent sur le fait que les neurones omnipauseurs (OPN) exerceraient leur inhibition sur les SBN et les SVBN uniquement, quand les VFN seraient eux sous contrôle de neurones omnipauseurs spécifiques (VPN, voir modèle de contrôle de vergence pure). Les SVBN généreraient une commande prémotrice de vergence horizontale, mais seulement pendant un mouvement combiné saccade/vergence. La sommation de cet influx avec celui des VFN serait donc à l'origine de l'accélération de la vergence pendant un mouvement combiné, et la même quantité d'influx (1/2) sera envoyé à chaque œil, en accord avec la théorie de Hering.



Modèle SVBN, d'après Zee et al., 1992

Le modèle multiplicateur (Multiply model) :

Pour ce modèle, les auteurs supposent que l'accélération du mouvement de vergence pendant un mouvement combiné puisse être la résultante d'interactions non linéaires. Ici encore, cette interaction se ferait au niveau prémoteur, étant donné l'existence de neurones générateurs de saccades (SBN) et de vergence (VVN) distincts. Les auteurs proposent dès lors que, si les VVN sont inhibés par des neurones pauseurs spécifiques (VPN), les neurones omnipauseurs (OPN), qui inhibent d'habitude uniquement les SBN dans leur premier modèle, seraient aussi impliqués en partie dans l'inhibition des VVN lors de mouvements de saccades. Ainsi, l'action des VVN pendant une saccade ou un mouvement combiné serait facilitée par une augmentation du gain (k) accordé au VVN de façon non linéaire, et ce lié une fois de plus au silence des OPN. Leur influence serait donc indirecte sur les neurones responsables de la réponse de vergence (VVN).



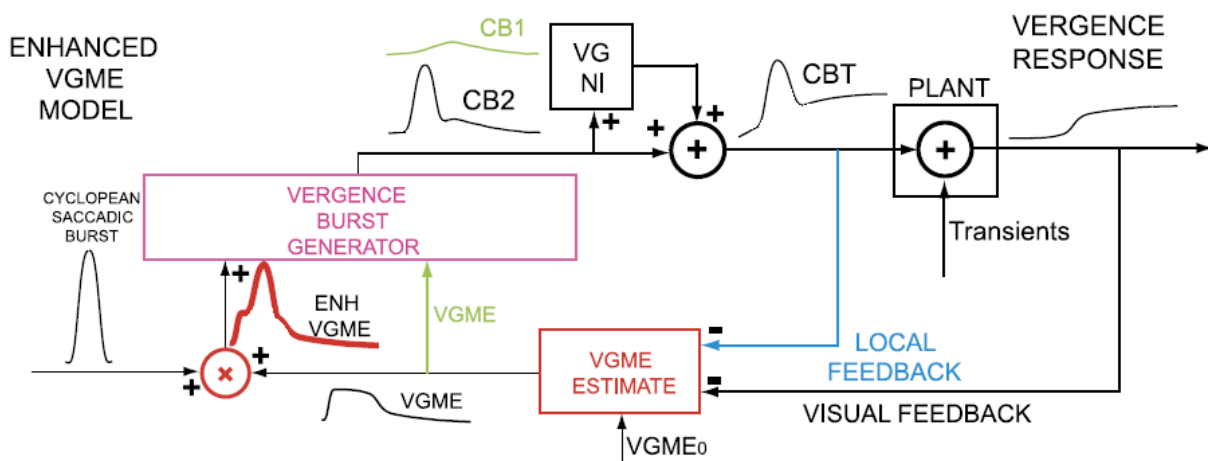
Modèle Multiplicateur, d'après Zee et al., 1992

6.1.2. Modèle de Busetini et Mays (2005)

L'inconvénient du dernier modèle est qu'il ne prend cependant pas en compte la vitesse de la saccade pour expliquer le changement de dynamique dans la vergence, remarque soulevée une dizaine d'années plus tard et en lien avec les progrès réalisés dans la précision des mesures de

mouvement. Busetini et Mays (2005) ont alors proposé plusieurs modèles dérivés du Multiplieur de Zee et al. Les neurones OPN étant inhibés tout le long du mouvement de saccade, il apparaît que l'accélération de la vergence pendant un mouvement combiné soit le fruit d'une interaction entre la commande de vitesse de la saccade et la commande d'erreur motrice de la vergence (VME), interaction qui n'était pas prise en compte dans le premier modèle de Zee et al. (1992). Les auteurs plaident pour l'existence d'une multiplication entre le signal d'erreur de vergence et la commande de position de la saccade. Ils introduisent ainsi l'idée d'un mécanisme de feedback interne non visuel, étant donné la rapidité de la réponse en vergence, qui apporterait des indications dans l'évolution du mouvement, à partir de la comparaison des dynamiques de la réponse de vergence lors d'un mouvement pur et lors d'un mouvement combiné.

Le modèle de commande de vergence améliorée (*enhanced VGME*) que les auteurs proposent apparaît comme être le plus adapté aux constatations dynamiques présentées précédemment. Celui-ci caractérise en effet le fait que, selon eux, l'interaction entre saccade et vergence se ferait au niveau cortical, et c'est l'existence d'une boucle de rétroaction locale qui expliquerait l'accélération du mouvement de vergence.



Modèle enhanced VGME, d'après Busetini et Mays, 2005

Cette boucle serait constituée d'une composante interne issue de la commande motrice phasique-tonique (Local Feedback) et de latence courte, ainsi que d'une composante visuelle (Visual Feedback) et de délai plus long. Au sein du mécanisme *VGME estimate*, l'erreur motrice de la commande de vergence initiale ($VGME_0$) va être comparée à ce feedback. Une commande de vergence phasique ($VGME$) va dès lors être envoyée directement au générateur de vergence (VBG). Cependant, et c'est là la clef du modèle, une version multipliée de cette

commande avec la commande phasique saccadique va elle aussi rejoindre le VBG (VGME ENH). Deux sous-groupes de neurones de vergence recevront une commande du VBG : CB1, qui codent pour la vitesse de la vergence non accélérée, et CB2, qui coderaient pour la vergence accélérée. Afin de maintenir l'angle de vergence fixe à la fin du mouvement, cette commande sera intégrée neuralemement au sein du VG IN pour donner lieu à une commande tonique.

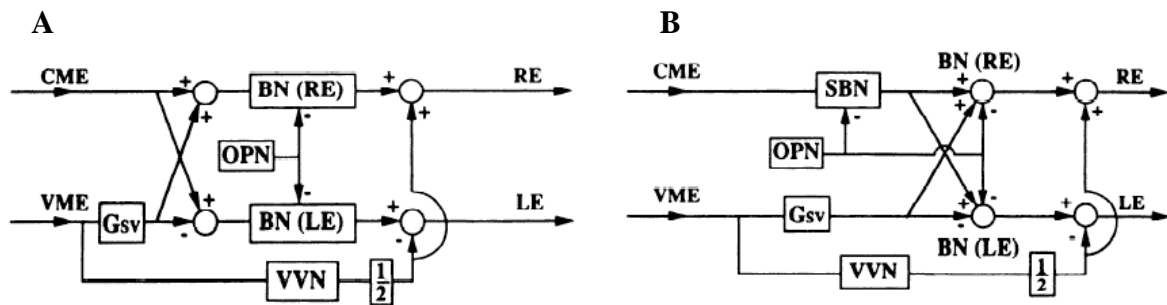
6.2. Modèles de coordination monoculaire

L'autre hypothèse concernant le contrôle des mouvements combinés découlerait de la pensée de Helmholtz : les mouvements de saccades pourraient être disconjugués, avec l'existence de deux générateurs dissociés et monoculaires permettant d'effectuer des saccades d'amplitude différente pour les deux yeux. La commande de vergence serait dès lors intégrée dans la disconjugaison. Théorie beaucoup moins reprise dans la littérature, elle ne peut cependant pas être totalement écartée (Coubard, 2013) et différents modèles proposent l'existence de générateurs de mouvements séparés pour chaque œil.

6.2.1. Modèle DB et DB modifié de Zee et al. (1992)

L'équipe de Zee a aussi évoqué deux autres modèles, plus en adéquation avec la théorie de Helmholtz. Dans le premier (DB, décharge différentielle), ils proposent l'existence de deux générateurs phasiques séparés pour l'œil droit [BN (RE)] et l'œil gauche [BN (LE)]. Les commandes d'erreurs de saccades (CME) et de vergence (VME) à l'origine du mouvement sont envoyées à ces générateurs dissociés, en signe identique concernant le mouvement conjugué (saccade) et en signe opposé concernant le mouvement disconjugué (vergence), et additionnées. Elles sont recomposées à la sortie pour ainsi former la commande de chaque œil. Les OPN exercent leur contrôle inhibiteur sur les neurones phasiques des deux yeux, et sont donc capables en ce sens de sélectivement contrôler aussi la commande de vergence pendant une saccade. Ainsi, le silence des OPN permettrait une fois encore de faciliter l'accélération du mouvement de vergence, comme vu précédemment dans les autres différents modèles présentés. Cependant, ce modèle rencontre des problèmes pour correspondre aux données expérimentales et manque de flexibilité : les mouvements de vergence intra-saccadique ne pourraient pas être modélisés pour interagir correctement avec les changements d'alignements horizontaux attribués aux mouvements de saccades. Les auteurs ont donc proposé un deuxième modèle (Modified DB) s'inspirant du premier, dans lequel ils supposent

l'existence d'une classe de neurones spécifiques dans le tronc cérébral (SBN), d'où serait issue une première commande de vitesse saccadique en direction des générateurs monoculaires, à partir de la commande d'erreur de la saccade (CME). Ici, les auteurs introduisent donc un générateur binoculaire, qui serait sous le contrôle inhibiteur des OPN, tout comme les générateurs monoculaires. Cependant, cet ajout n'a pas rendu ce modèle plus flexible.

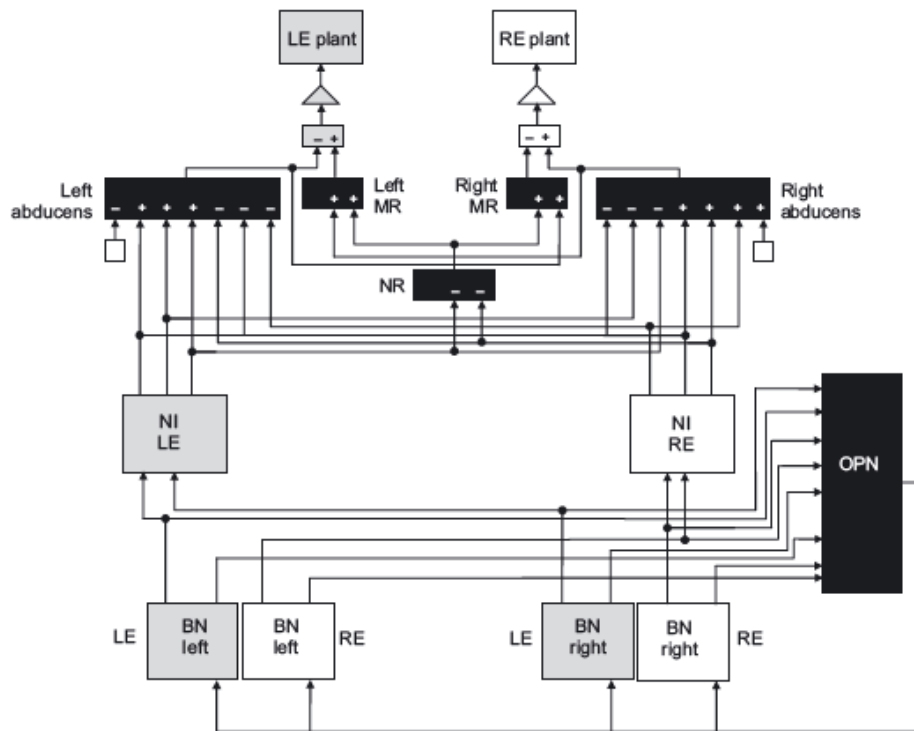


Modèle de décharge différentielle (DB, A) et modèle modifié de décharge différentielle (Modified DB, B), d'après Zee et al., 1992

6.2.2. Modèle de King et Zhou (2002)

Le modèle de King et Zhou est différent de ceux étudiés précédemment, et ce pour trois raisons majeures : (1) ils supposent l'existence de générateurs phasiques monoculaires, (2) les motoneurones reçoivent des commandes binoculaires et (3) les intégrateurs neuraux monoculaires présentent des connexions avec les neurones de la réponse en vision proche (NR, *near response*). En accord avec la théorie de Helmholtz, les commandes prémotrices seraient donc monoculaires et seraient issues d'erreurs rétinienne, monoculaires elles aussi. Pour un mouvement de saccade par exemple, il y aurait 4 générateurs de commandes phasiques : 2 pour chaque œil, et parmi eux un pour chaque direction (droite et gauche). Les OPN agiraient ici encore dans le contrôle inhibiteur, leur levée entraînant le mouvement. L'information motrice générée au sein du générateur phasique va transiter via des intégrateurs distincts et spécifiques à chaque œil. Ainsi, les signaux seront combinés au niveau des motoneurones et de ce fait, produiront une commande binoculaire. Une dissociation se ferait alors dans la nature de l'information : les signaux codants pour la vitesse (*pulse*) et le glissement (*slide*) ne seraient transmis aux motoneurones uniquement via les neurones abducens et les interneurones, quand les signaux codants pour la position (*step*) seraient dirigés vers les neurones phasiques mésencéphaliques de vergence. Ainsi, lors d'un mouvement de saccade pure, la totalité des signaux de vitesse, glissement et position serait

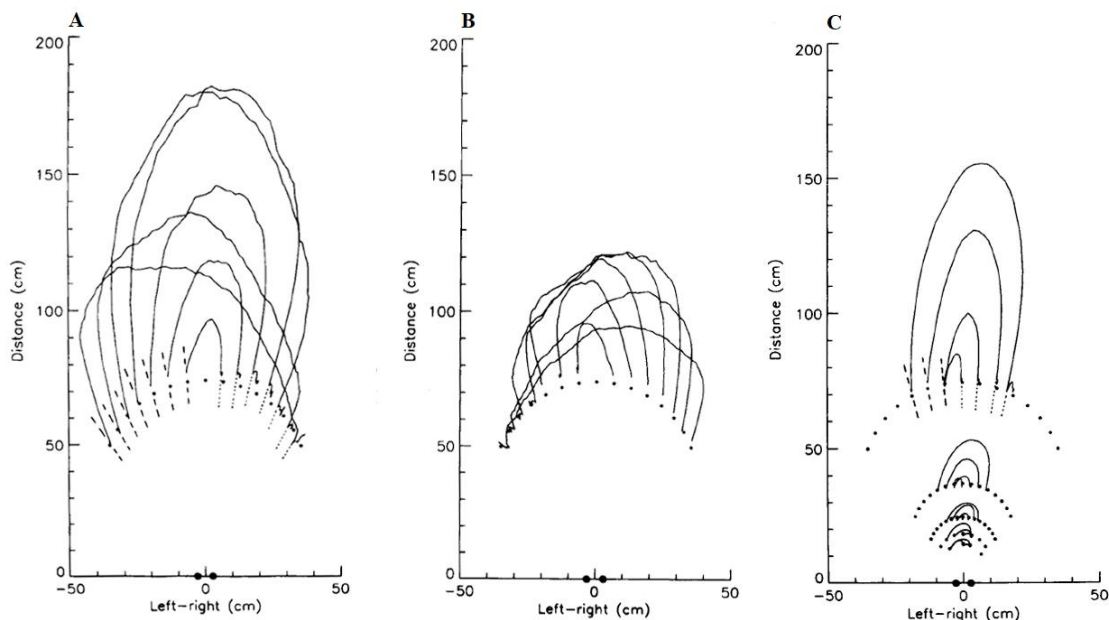
symétriquement envoyée aux motoneurones abducens et interneurons, provoquant ainsi la contraction des muscles droits internes et externes agonistes. Lors d'un mouvement combiné saccade-vergence, l'action des motoneurones mésencéphaliques de vergence expliquerait l'accélération du mouvement de vergence pendant la saccade.



Modèle de contrôleur de saccade distinct, d'après King et Zhou (2002).

6.3. Vergence et la coordination binoculaire de la saccade

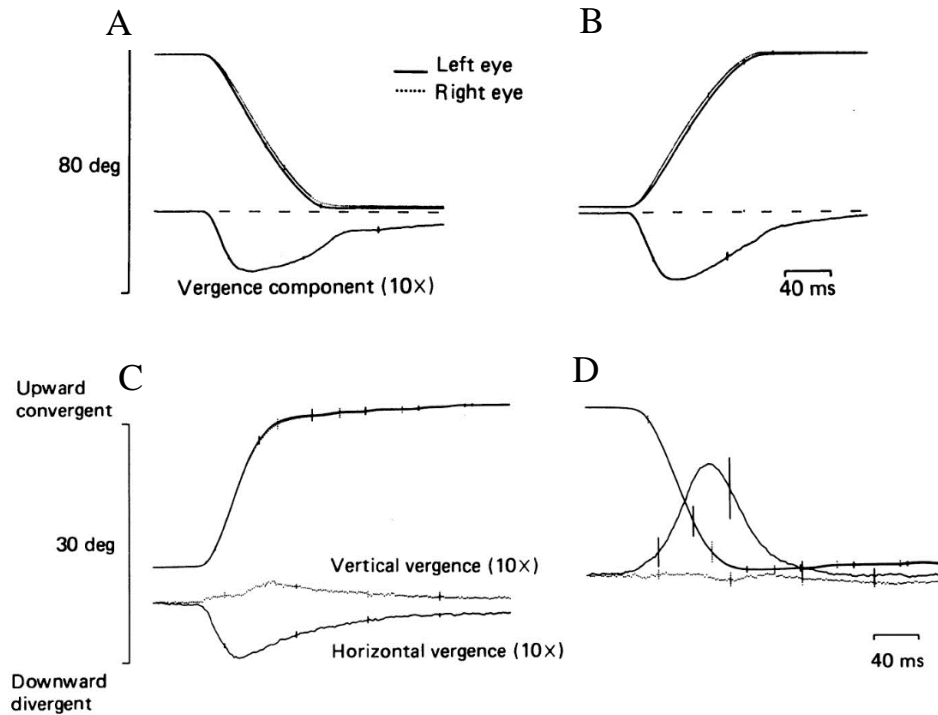
Dans le cadre de notre travail, ces modèles dernièrement exposés sont importants pour l'approfondissement des caractéristiques de la motricité binoculaire. Si l'interaction entre saccade et vergence se constate en particulier pendant les mouvements combinés, il est désormais essentiel pour nous de nous concentrer sur la coordination binoculaire des saccades, qui reste aussi un débat central de la controverse opposant Hering et Helmholtz. D'un point de vue binoculaire, Kapoula et al. (1986) avaient réalisé une étude pionnière mettant en évidence une différence entre la saccade de l'œil adducteur et de l'œil abducteur : un œil tournait plus que l'autre. Les résultats présentés par l'équipe de Collewijn (1995 et 1997), comparant les trajectoires des saccades pures réalisées à différentes distances et de différentes amplitudes aux saccades des yeux pendant des mouvements combinés, font état de l'existence d'une discordance entre le mouvement de l'œil droit et celui de l'œil gauche : pendant un mouvement de saccade, on enregistre un changement caractéristique de l'angle de vergence, comme pendant des mouvements combinés, ce qui avait déjà été démontré par les mêmes auteurs un peu plus tôt (Collewijn et al., 1988a et b). En effet, ces enregistrements précis ont montré qu'il existait une asymétrie entre les mouvements des deux yeux en prenant en compte différents paramètres : l'amplitude du mouvement, la durée du mouvement, la vitesse maximale et la durée de la phase d'accélération.



Trajectoires des saccades sur un cercle d'iso-vergence 5° vers la droite (A) ou vers la gauche (B), et sur différents cercles d'iso-vergence vers la droite (C), selon le plan horizontal. Adapté de Collewijn et al., 1997.

Concernant les saccades horizontales, l'œil abducteur (en rotation vers l'extérieur) fait à la fois des saccades de plus grande amplitude et plus longues que l'œil adducteur (en rotation vers l'intérieur), de surcroît sa vitesse maximale est plus importante et est atteinte plus tôt. Il en résulte donc une asymétrie qui provoque une diminution de l'angle de vergence en début de saccade, que nous appellerons par la suite disconjugaison. Cette disconjugaison provoque une divergence en début de saccade qui est ensuite partiellement atténuée en fin de saccade. Dans leurs expérimentations (1988a et b), il reste cependant un résiduel divergent de 0.3° en moyenne pour des saccades d'amplitude supérieure à 5° . Leur plus récente étude (1997) montre aussi que plus la saccade est d'amplitude importante, plus la disconjugaison divergente le sera également, concernant des saccades allant jusqu'à 50° . Si elles s'avèrent plus importantes en amplitude, la disconjugaison diminuera de nouveau. Autre point important : la disconjugaison est plus importante en vision proche qu'en vision lointaine lorsqu'elle est exprimée en degrés, ce qui témoigne ici encore de l'interaction entre saccade et vergence.

Concernant les saccades verticales, la coordination des saccades est par contre ici bien meilleure et les mouvements des deux yeux quasiment identiques, excepté pour les saccades de grandes amplitudes ($>40^\circ$). Cependant, il est à noter que des mouvements stéréotypés et disconjugés non négligeables sont observés dans le plan horizontal, avec une divergence accentuée lors des saccades vers le haut et une convergence accentuée lors des saccades vers le bas. Même si, de nouveau, cette disconjugaison est diminuée en fin de saccade, le résiduel peut atteindre 1° lors des saccades vers le haut et 2° lors des saccades vers le bas, ce qui n'est pas négligeable quand on compare cette erreur de positionnement à la taille des aires de Panum.



Tracé des trajectoires de chaque œil (profil typique) lors de saccades vers la gauche (A), vers la droite (B), vers le haut (C) et vers le bas (D) et signal disconjugué horizontal (trait noir) et vertical (trait gris) associé. D'après Collewijn et al., 1988a et b.

Un bon contrôle du regard dans l'environnement tridimensionnel est reflété par la capacité à effectuer des mouvements oculaires coordonnés et précis vers une cible afin d'en obtenir une vision simple le plus rapidement possible. La disconjugaison pendant la saccade a fait l'objet de nombreuses études, et nous nous sommes majoritairement basés sur les travaux de Kapoula et al., (1986), Collewijn et al. (1988a et b), Vernet (2009) et Gaertner (2014) pour présenter ces spécificités.

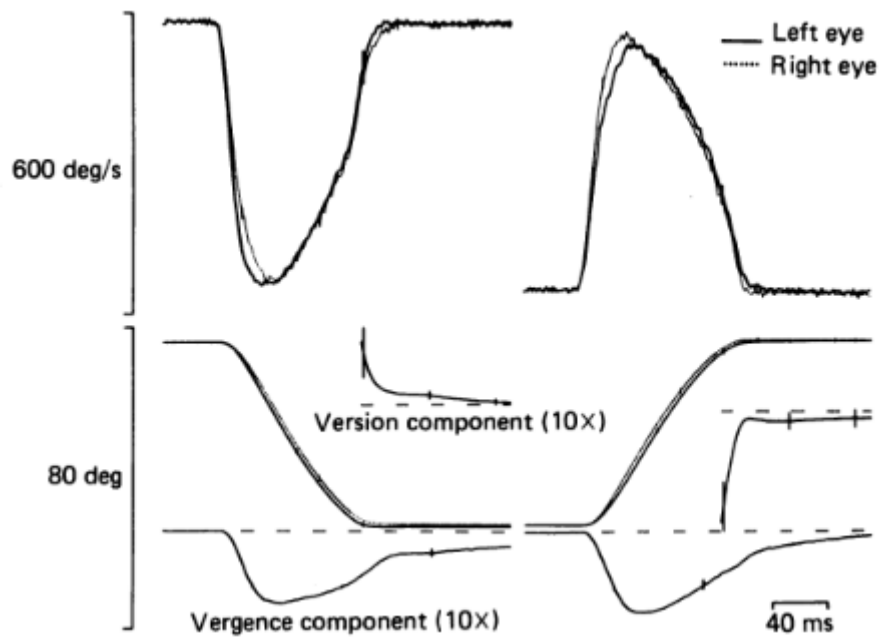
6.4. Origines possibles de la disconjugaison

La disconjugaison pendant une saccade est donc stéréotypée : on constate à chaque fois une divergence en début de mouvement suivi d'une convergence en fin de mouvement concernant les saccades horizontales (Kapoula, 1986 ; Collewijn et al. 1988a et b ; Collewijn et al. 1997). Les théories de Helmholtz et de Hering à ce sujet, peuvent expliquer chacune son existence. Helmholtz plaidait pour des commandes de mouvement monoculaires, et estimait qu'un apprentissage était nécessaire afin de réduire au maximum l'erreur de coordination pendant une saccade. Si nous rejoignons sa théorie sur ce dernier point (voir les travaux de Vernet, 2009), il en reste que la notion stéréotypée de la disconjugaison est en désaccord avec. D'autre part, King et Zhou, dans leur modèle présenté en 2002 en accord avec la théorie de

Helmoltz, indiquaient être en faveur de signaux exceptionnellement monoculaires lors des saccades pures. D'autant plus que les signaux de vergence envoyés aux neurones proviennent de diverses régions (Sylvestre et Cullen, 2002), la disconjugaison pendant les saccades ne résulterait pas de l'envoi de signaux inégaux aux deux yeux, mais plutôt de contributions stéréotypées liées à l'asymétrie des saccades. Même si, comme rappelé plus tôt, la théorie de Helmholtz ne peut pas être rejetée complètement (Coubard, 2013 ; Cullen et Van Horn, 2011), celle de Hering, qui plaide pour un signal équivalent envoyé aux deux yeux, paraît plus appropriée pour expliquer les données comportementales concernant la coordination binoculaire pendant une saccade.

Les asymétries périphériques, concernant des différences viscoélastiques entre les muscles ou de délai d'innervation entre les muscles coactivés (Collewyn et al., 1988a ; Zee et al., 1992) ont d'abord été avancées pour expliquer l'existence de la disconjugaison. Cependant, il apparaît que celles-ci ne peuvent pas expliquer entièrement la présence de ce petit défaut stéréotypé. Les travaux de Vernet (2009), Gaertner (2014) et de Yang et Kapoula (2003) montrent aussi l'implication qu'aurait la vergence dans la disconjugaison. Les auteurs plaident en effet pour l'existence d'un apprentissage central en termes de motricité qui permettrait de réduire un maximum l'effet des asymétries périphériques ainsi que de pouvoir moduler la disconjugaison en cas de nécessité.

Pendant la fixation consécutive à une saccade, les enregistrements post-saccadiques ont aussi montré l'existence de glissement conjugué et disconjugué des deux yeux (Kapoula, 1986 ; Collewyn et al., 1988a et b). De très faible amplitude, ces mouvements conjugués seraient directement liés à l'activité des motoneurones, alors que le glissement disconjugué serait pressenti pour la réduction de la disparité induite par la disconjugaison intra-saccadique (Kapoula, 1986 ; Vernet, 2009).



Tracés de la vitesse (figure du haut) et de la position des deux yeux (figure du bas) lors de mouvements de saccade de 50° vers la gauche (figure de gauche) et vers la droite (figure de droite). Les tracés des glissements post-saccadiques conjugués (version component) et disconjugués (vergence component) apparaissent de façon agrandie (10x). D'après Collewijn et al., 1988a.

Par la suite, nous allons revenir sur l'évolution de la disconjugaison pendant le développement d'un individu, afin de mieux comprendre comment la vergence peut avoir un impact dans la coordination d'un mouvement de saccade.

6.5. La disconjugaison et son évolution

Il a été constaté que l'apprentissage avait un rôle dans le peaufinement de la précision et de la coordination des saccades. La première étude en ayant fait état est celle de Fioravanti et al. (1995), qui ont comparé le comportement moteur pendant des saccades d'amplitude allant de 5° à 25° sur des cibles à une distance d'un mètre pour 3 classes d'âge différentes : 5-9 ans, 11-13 ans et adultes. En ce qui concerne le comportement conjugué, les plus jeunes (<10 ans) avaient plus tendance à faire de petites saccades hypermétriques et de grandes saccades hypométriques : la précision des saccades était meilleure chez les individus plus âgés (adultes). Les glissements post-saccadiques conjugués témoignaient aussi de cette situation. Servant en général à corriger l'erreur de positionnement à la fin de la saccade, leur amplitude était plus importante chez les enfants que chez les adultes. Des résultats similaires ont été retrouvés dans les études de Yang et Kapoula (2003) et de Salman et al. (2006). Les différents auteurs font aussi état de profils dynamiques différents concernant en particulier le pic de

vitesse qui est atteint plus tard chez les plus jeunes. La programmation de la taille des saccades serait donc correcte et liée à la maturation rapide du tronc cérébral, cependant certaines caractéristiques seraient encore en développement avant l'âge de 10 ans et liées à une prolongation de la maturation corticale (Yang et al., 2002 ; Barkovitch, 2000).

Concernant maintenant la coordination binoculaire pendant la saccade horizontale, matérialisée par la mesure de disconjugaison, Fioravanti et al. (1995) ont montré que les enfants les plus jeunes (5-9 ans) présentaient une valeur positive (convergente) pendant les saccades, alors que les enfants plus âgés (11-13 ans) et les adultes présentaient eux les profils stéréotypés de disconjugaison divergente, comme retrouvé plus tôt par Collewijn et al. (1988a). Chez les enfants les plus jeunes, le mouvement de l'œil abducteur présentait des caractéristiques particulières : une amplitude plus petite, un pic de vitesse moins important et une durée d'accélération plus longue que la saccade de l'autre œil, contrairement à ce qui était observé chez les individus plus âgés. De plus, l'amplitude de la disconjugaison diminuait à mesure que les enfants étaient plus âgés, ceci témoignant d'une amélioration de la coordination binoculaire avec le temps, ceci pouvant découler de la diminution de la dissymétrie entre mouvement de l'œil gauche et de l'œil droit. Plus tard, une étude de Yang et Kapoula (2003) est venue approfondir ces constatations. Les auteurs notent une disconjugaison similaire des saccades lorsque celles-ci sont effectuées à des distance de 1.5m entre enfants (4.5 à 12 ans) et adultes (28 ans de moyenne). Cette valeur est cependant plus importante en vision proche (40cm) pour une même amplitude de mouvement (20°) chez l'adulte et surtout chez l'enfant, où l'on constate des valeurs pouvant atteindre jusqu'à 2° en fin de saccade. Ces résultats corroborent ceux de Collewijn et al. (1997) concernant l'amplitude de la disconjugaison plus importante quand l'angle de vergence à maintenir augmente, c'est-à-dire plus la cible est proche. Cependant, en analysant plus précisément le groupe des enfants, Yang et Kapoula ont montré que la disconjugaison était réduite avec l'âge, avec une amélioration importante autour de 7 ans, et que son signe évoluait aussi, pour être de plus en plus divergente, à distance lointaine comme proche. De la même façon que pour les comportements conjugués, étant donné la maturité du système prémoteur déjà établie, ces résultats seraient liés à une immaturité cortico-sous-corticale, et la disconjugaison accentuée par la demande croissante en convergence. La liaison entre expérience visuelle, vergence et coordination des saccades apparaît donc ici de façon plus prononcée. Pour expliquer ces résultats, Yang et Kapoula (2003) émettent l'hypothèse que le système nerveux central apprend progressivement à coupler une commande de vergence rapide pendant une

saccade, son but étant d'aider à réduire les effets des asymétries périphériques présentées plus haut. Cependant, lorsque les yeux sont en position de convergence, donc en vision proche, cette commande est plus difficile à mettre en place et nécessiterait un apprentissage plus long. C'est ici que la maturité et la qualité de la vergence entre en compte. En effet, un bon contrôle de la vergence apparaît indispensable pour la réalisation de ce couplage spécifique et le bon fonctionnement de la coordination des deux yeux.

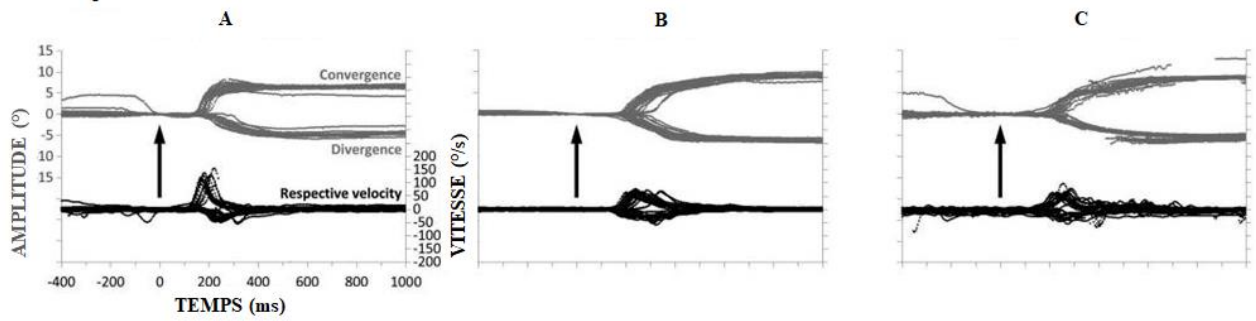
6.6. Troubles de la vergence : étude clinique et rééducation

La nécessité de mettre en parallèle les diagnostics cliniques orthoptiques ou optométriques des désordres de vergence et/ou d'accommodation avec des mesures objectives concernant la motricité binoculaire est au cœur de notre démarche. Nous allons faire par la suite une revue exhaustive des études déjà réalisées à ce sujet.

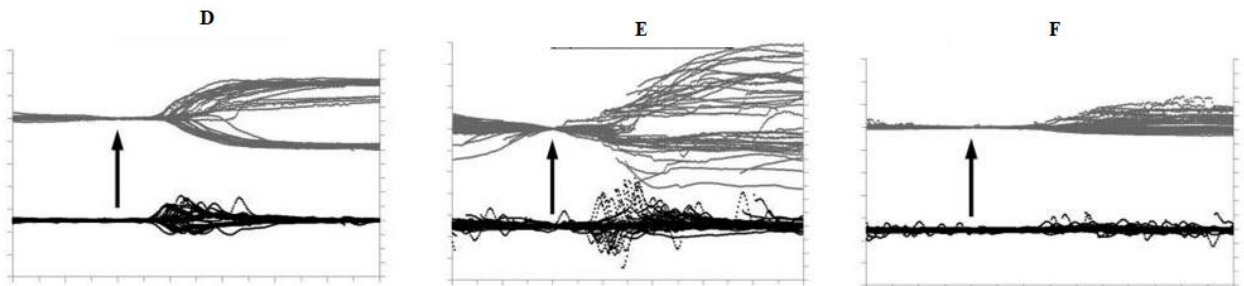
Chez des enfants montrant des troubles de l'équilibre et des vertiges, sans association avec d'éventuels troubles vestibulaires, mais présentant des désordres de la vergence (capacités réduites), Bucci et al. (2004) ont montré une latence allongée, une mauvaise précision et une vitesse plus lente des mouvements de vergence, purs ou combinés à des saccades. Plus tard, Bucci et al. (2011) ont aussi montré la présence de latences plus longues dans la plupart des mouvements (vergence, saccade, combinés) chez des enfants présentant des capacités de vergence réduites. Les vergences objectivement mesurées étaient significativement diminuées en comparaison des sujets contrôle.

L'étude de Kapoula et al. (2016) réalisée chez de jeunes adultes (âge moyen de 23 ans) montre qu'en cas de bilan orthoptique indiquant des troubles de la vergence, la précision des mouvements de vergence objectivement mesurée est moins importante que chez des sujets contrôle, les latences sont aussi plus longues mais surtout, la variabilité du mouvement est beaucoup plus grande. Les dysfonctionnements détectés au préalable par un examen orthoptique sont ainsi objectivés par la mise en évidence des lenteurs de latence et de grandes variabilités. De plus, la variabilité retrouvée concernant différents paramètres pour ces mêmes mouvements (latence, gain, pic de vitesse et durée du mouvement) était très importante en comparaison de celle retrouvée chez le groupe contrôle. Cette étude montre pour la première fois que la variabilité est un biomarqueur des dysfonctionnements de vergence recensés cliniquement.

Sujets « contrôle »

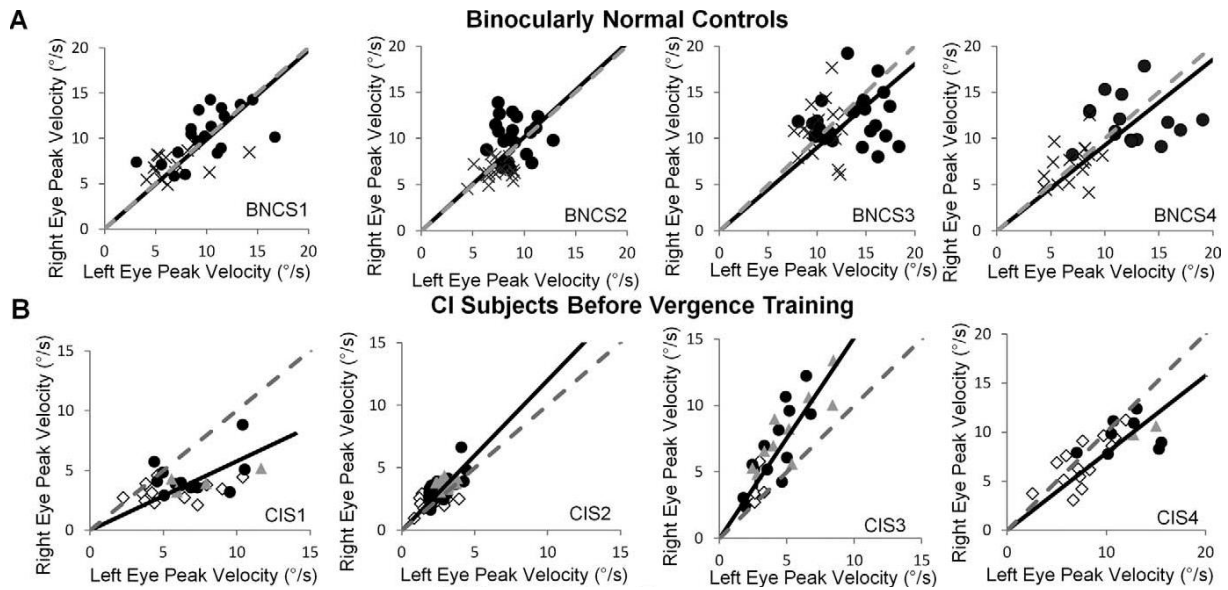


Sujets présentant un dysfonctionnement



Tracés des mouvements de convergence et de divergence chez trois sujets ne présentant pas de désordres de la vergence (A, B et C) et chez trois sujets présentant un désordre (D, E et F, tracés gris) et tracés de la vitesse du mouvement (tracés noirs). Dans les 3 premiers cas, en divergence comme en convergence, les trajectoires sont similaires essais après essais, et le mouvement atteint sa cible (indiquée par la ligne) dans la plupart des cas. Les personnes présentant un désordre de la vergence montrent des difficultés à atteindre la cible demandée (ex : D, E et F) et/ou à reproduire des trajectoires identiques dans le temps (ex : D et E). Adapté de Kapoula et al., 2016.

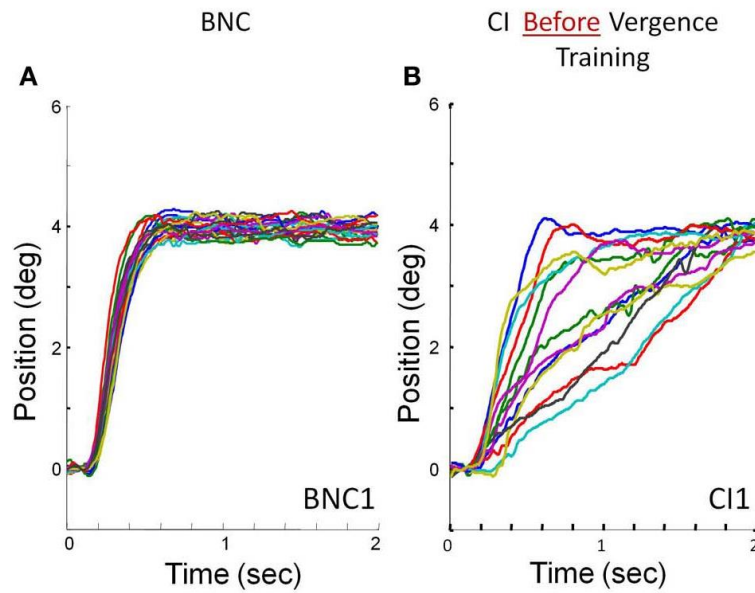
Ces résultats sont dans la lignée de ceux de Van Leeuwen et al. (1999), qui avaient soulevé des problèmes similaires rencontrés par les personnes présentant une IC pour accomplir entièrement et précisément des mouvements de convergence. Par ailleurs, les travaux de l'équipe d'Alvarez (2010) se sont eux aussi focalisés sur de jeunes adultes atteints d'IC, et plus particulièrement sur la dynamique des mouvements de vergence. Il a été mis en évidence des pics de vitesse plus bas lors des mouvements de convergence en comparaison des sujets contrôle : le pic de vélocité était significativement plus bas, toutefois ceci n'était pas le cas pour la divergence. Alvarez et Kim (2013) ont ensuite approfondi leurs recherches concernant la coordination des mouvements de vergence et ont montré que chez les adultes présentant une insuffisance de convergence, les pics de vitesse des deux yeux présentaient une différence notable, ce qui ne se retrouvait pas chez les sujets contrôle.



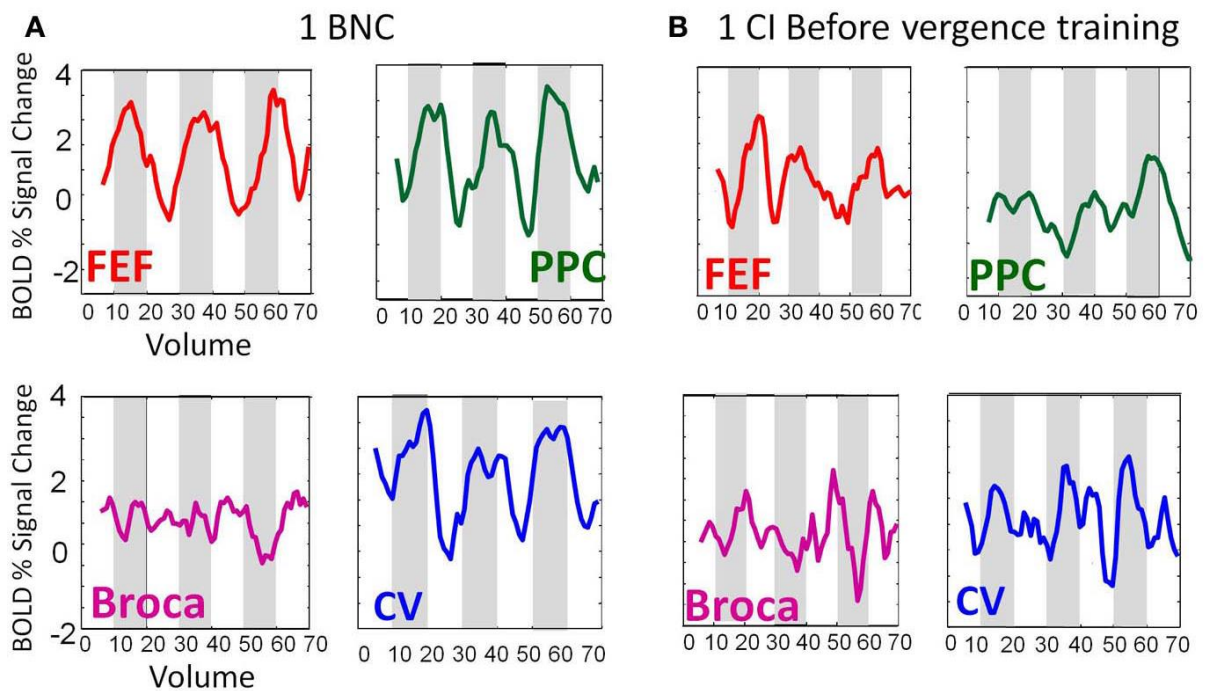
Représentation du pic de vitesse de l'œil droit en fonction de celui de l'œil gauche pendant un mouvement de vergence dans le plan médian chez des sujets présentant une vision binoculaire normale (A) et chez des sujets diagnostiqués en insuffisance de convergence (B) avec les droites de tendance associées (noires). La ligne en pointillé matérialise la symétrie parfaite. Adapté d'Alvarez et Kim, 2013.

Enfin, Alvarez et al. (2014) ont utilisé une technologie d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) pour identifier les différentes régions corticales et sous-corticales impliquées dans la réponse de vergence. Ils ont rapporté une activation de la région frontale (FEF, aire de Broca), la région pariétale (PPC) ou le cervelet (Vermis du cervelet). L'activité dans ces régions est diminuée pendant les mouvements de vergence en comparaison à des sujets contrôle, ce qui pourrait apporter une explication supplémentaire aux résultats moteurs développés précédemment.

1.



2.



1. Représentation des trajectoires des deux yeux lors d'un mouvement de convergence de 4° chez un sujet présentant une vision binoculaire normale (BNC, A) et chez un sujet diagnostiqué en insuffisance de convergence (CI1, B). Les différences notables déjà identifiées par d'autres auteurs sont encore retrouvées ici : précision diminuée (gain plus faible), variabilité et rapidité amoindrie dans le mouvement de convergence chez un sujet présentant une IC. 2. Evolution du signal BOLD, reflétant les variations locales de la quantité d'oxygène transportée par l'hémoglobine en fonction de l'activité neuronale dans les régions du champ oculomoteur frontal (FEF), du cortex pariétal postérieur (PPC), de l'aire de Broca (Broca) et du vermis du cervelet (CV) pendant les phases alternées de mouvements de vergence et de fixation. Adapté d'Alvarez et al., 2014.

Ces problèmes de coordination pendant des mouvements de vergence pure, qui peuvent être mis en parallèle avec ceux rencontrés pendant des mouvements de saccades ou des mouvements combinés comme par exemple chez les enfants (Bucci et al., 2004), montrent encore une fois l'implication de la qualité de la vergence dans la motricité binoculaire en générale. Il est dès lors important pour l'approfondissement de ces constats, d'observer si le fait de rééduquer la vergence peut avoir un impact sur la motricité fine globale, en accord avec l'hypothèse de Yang et Kapoula (2003). Si la coordination des saccades est basée sur l'apprentissage, elle apparaît aussi être impactée par la qualité de la vergence et son contrôle.

6.6.1. Recherche sur la neuroplasticité oculomotrice

Dans ce domaine, les termes apprentissage, adaptation ou neuroplasticité sont utilisés pour désigner le même concept. La plasticité neuronale peut se définir comme la capacité des neurones à se remodeler et entraîner des modifications fonctionnelles pour s'adapter à un environnement changeant. Concernant l'oculomotricité, l'adaptation des mouvements de saccade a fait l'objet de nombreuses d'études (Péllisson et al., 2010 ; Panouillères et al., 2013 ; Herman et al., 2013 ; Optican et al., 1985). Le feedback visuel étant trop lent pour pouvoir corriger la saccade en cours d'exécution, les études se focalisent sur des phénomènes adaptatifs en différé qui servent à recalibrer le gain des commandes motrices (Scudder, 2009). Cette adaptation serait donc liée à un apprentissage moteur basé sur l'expérience visuelle, à savoir l'erreur visuelle restante à la fin de la saccade, et la structure majoritairement impliquée est le cervelet (CV, Takagi et al., 1998). En effet, les études portant sur les individus présentant des lésions au niveau du cervelet ont montré un désordre dans la capacité à adapter les mouvements de saccades et de poursuites à long terme. L'adaptation des mouvements de vergence a aussi été démontrée, comme par exemple par le biais de paradigmes « *double step* » (Takagi et al., 2001).

La plasticité normale à l'âge adulte a pu aussi être testée par l'induction d'une perturbation optique. Les expérimentations de Lemij et Collewijn (1991a et b, 1992), utilisant des lunettes anisométriques afin d'induire des effets prismatiques différents pour l'œil droit et l'œil gauche ainsi que modifier la taille des images rétinienne des deux yeux, ont montré qu'il existait une adaptation des mouvements de saccades sur le court et le long terme. Les résultats de Eggert et Kapoula (1995) et de Kapoula et al. (1995) montrent aussi une adaptation rapide de la coordination binoculaire des saccades pendant le port de lunettes anisométriques.

Cet apprentissage, sur le court ou long terme, fait référence à la capacité de modulation des mouvements oculaires, donc de la commande centrale de mouvement, qui implique un réseau d'aires corticales spécifiques (frontales, pariétales, cervelet). Lors de séances de rééducation orthoptiques, l'adaptation à une demande de vergence et/ou d'accommodation spécifique est stimulée, les changements rapides de distance de fixation et de direction sont eux aussi utilisés pour entraîner à la flexibilité. Ces pratiques cliniques mettent sans doute en jeu la neuroplasticité oculomotrice, plus particulièrement des mouvements de vergence et de leur rapport avec l'accommodation.

6.6.2. Réhabilitation orthoptique de la vergence et neuroplasticité

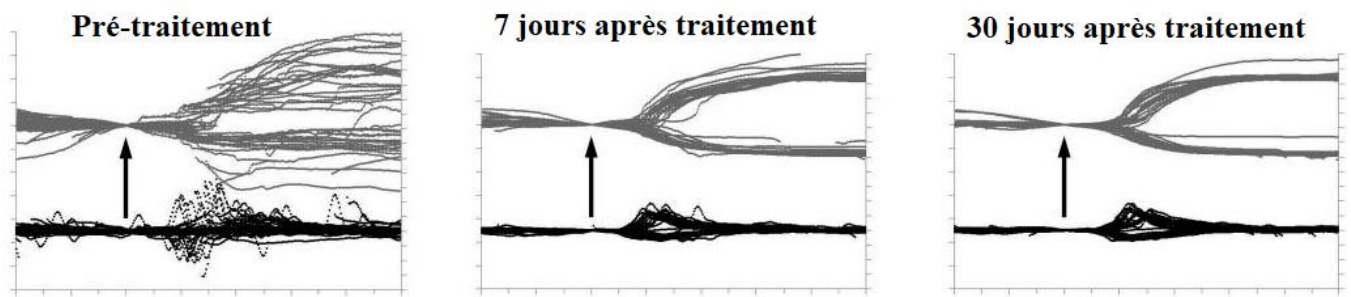
L'orthoptie et l'entraînement visuel peuvent drastiquement améliorer certaines situations concernant les dysfonctionnements de vergence et/ou d'accommodation (Vaegan, 1979 ; Dalziel, 1981 ; Daum, 1982), en particulier dans les cas d'insuffisance de convergence (IC) (Cooper et al., 1983 ; Cooper et Jamal, 2012 ; Thiagarajan et al., 2011 ; Lavrich, 2010 ; Von Noorden, 2002 ; Scheiman et al., 2002 et 2005 ; Scheiman et Wick, 2014). De nombreuses possibilités sont offertes aux praticiens, nécessitant parfois du matériel contraignant (synoptophore, stéréoscope, exercices en espace virtuel...) et donc réalisable uniquement en clinique (*office-based*), ou du matériel moins perfectionné pour des exercices réalisables directement chez soi (*home-based*, push-up pen, vectogrammes, tranaglyphes, balle de marsden, corde de Brock, cartes en espace réel, jeux vidéo...). L'efficacité des différents traitements a été prouvée, en particulier dans les cas d'IC, d'une part concernant la diminution des symptômes post-traitement comme développé plus tôt (Lavrich, 2010 ; Von Noorden, 2002), d'autre part concernant les tests cliniques pour lesquels les sujets présentent des résultats en deçà des normes à la base (Punctum proximum de convergence, réserves fusionnelles, rapport AC/A et phorie en vision proche ; Cooper et Jamal, 2012 ; Scheiman et al., 2002 ; Von Noorden, 2002 ; Serna et al., 2011 ; Brautaset et al., 2006 ; Momeni-Moghaddam et al., 2015 ; Dragomir et al., 2001).

Un premier pas vers une incidence plus profonde de la réhabilitation de la fonction de vergence, en lien avec la neuroplasticité, a été fait plus récemment. Thiagarajan et al. (2010) ont montré l'impact que la rééducation chez les sujets diagnostiqués en IC pouvait avoir à la fois sur les capacités maximales de convergence mesurées de façon clinique (raccourcissement du Punctum Proximum de Convergence et diminution subjective de la symptomatologie, augmentation des réserves fusionnelles en convergence), mais aussi sur la

réponse lente de vergence et les vergences d'adaptation. En effet, les mesures post-entraînement ont montré que les sujets rééduqués s'adaptaient plus rapidement et réduisaient de façon plus importante une exophorie induite par des prismes, les forçant à maintenir un angle de vergence plus important (12Δ en base externe). Ces résultats montrent que les données habituellement trouvées et démontrant l'efficacité d'un traitement orthoptique dans la réponse dite « rapide » de vergence (réserves fusionnelles, Punctum Proximum de Convergence, rock prismatique) sont aussi directement liées à une mise en place plus vélocité et efficiente de la réponse « lente », faisant référence à une adaptation sur le long terme. Dans l'aspect statique de la vergence, les critères de confort seront donc à la fois respectés grâce à l'augmentation des réserves fusionnelles, les phories seront donc d'autant mieux corrigées et les symptômes liés à ces dysfonctionnements atténués, mais il est de surcroît possible de supposer que le maintien de l'angle de vergence dans le temps, au cours d'activité particulière comme en vision proche, sera facilité par l'activité plus précise et rapide des vergences d'adaptation. Par analogie, il est donc probable qu'une phorie plus aisément corrigée et qu'un angle de vergence stabilisé sur une plus longue période entraînent aussi une diminution des symptômes liés à la base au dysfonctionnement diagnostiqué (Cooper, 1992).

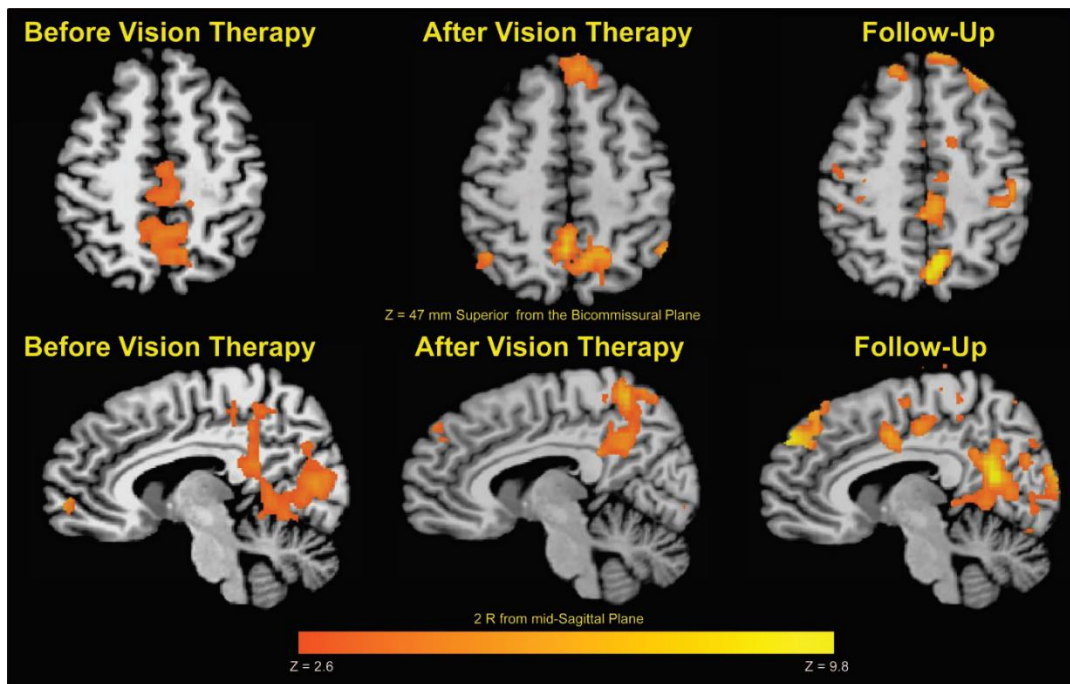
Concernant les effets de l'entraînement visuo-moteur sur l'aspect dynamique de la vergence et de l'accommodation, un nombre moins fourni d'études font état de caractéristiques particulières concernant les sujets présentant un dysfonctionnement. Lors de l'étude de variations importantes, en convergence ou en divergence, de l'angle de vergence, les travaux de van Leeuwen et al. (1999) et Alvarez et al. (2010) montrent qu'à la fois le gain calculé (amplitude réalisée/amplitude attendue) et le pic de vélocité sont plus bas pendant un mouvement de convergence chez les sujets présentant une IC, révélé grâce à la vidéo-oculographie. A la suite d'une rééducation des sujets diagnostiqués et en association avec les caractéristiques cliniques usuellement observées (raccourcissement du Punctum Proximum de Convergence, diminution de la symptomatologie et augmentation des réserves fusionnelles positives), Alvarez et al. (2010) ont aussi relevé une augmentation du gain, ainsi que des pics de vélocité plus symétriques et plus importants pendant des mouvements de convergence. De plus, les mouvements de saccades, enregistrés au début des mouvements de vergence et considérés comme un mécanisme compensateur par les sujets diagnostiqués en IC quand leur pic de vélocité est diminué, était significativement moins marqués après la rééducation (Alvarez et Kim, 2013).

Sur une population d'enfants souffrant de vertiges liés à des désordres de la vergence, Bucci et al. (2006) ont montré qu'une rééducation orthoptique avait amélioré les performances de vergence, tant au niveau des tests cliniques qu'au niveau des mouvements observés objectivement : diminution des latences de mouvement et augmentation de la précision (gain), en particulier en convergence. A partir d'un protocole inspiré des recherches effectuées concernant l'adaptation des mouvements de vergence (Takagi et al., 2001) et basé sur la neuroplasticité, Kapoula et al. (2016) ont montré que les sujets présentant des troubles de la vergence ont ensuite suivi une réhabilitation de leur vergence. Cet entraînement était basé sur la répétition de mouvements de vergence pendant un protocole « *double step* » : une cible plus proche ou plus éloignée qu'un premier point de fixation apparaissait sur un laps de temps très court (<200ms) puis disparaissait pour laisser place à une deuxième cible respectivement encore plus proche (entraînement de la convergence) ou encore plus éloignée (entraînement de la divergence). Le sujet préparait donc un mouvement vers une première cible et devait ensuite très rapidement corriger cette trajectoire pour atteindre la cible finale. A la suite de cet entraînement, les caractéristiques usuelles démontrant l'efficacité du traitement ont été retrouvées (augmentation des réserves fusionnelles, diminution significative de la symptomatologie, raccourcissement du Punctum Proximum de Convergence), en association cette fois avec des critères dynamiques : augmentation significative du gain en convergence et divergence atteignant cette fois des valeurs similaires au groupe contrôle non rééduqué, diminution significative de la variabilité des mouvements (gain, pic de vitesse et vitesse moyenne) et de leur latence et durée, montrant une réponse en vergence dynamique plus rapide (latence et durée), plus précise (gain) et surtout plus régulière (diminution significative de la variabilité des réponses), donc un meilleur contrôle du mouvement.



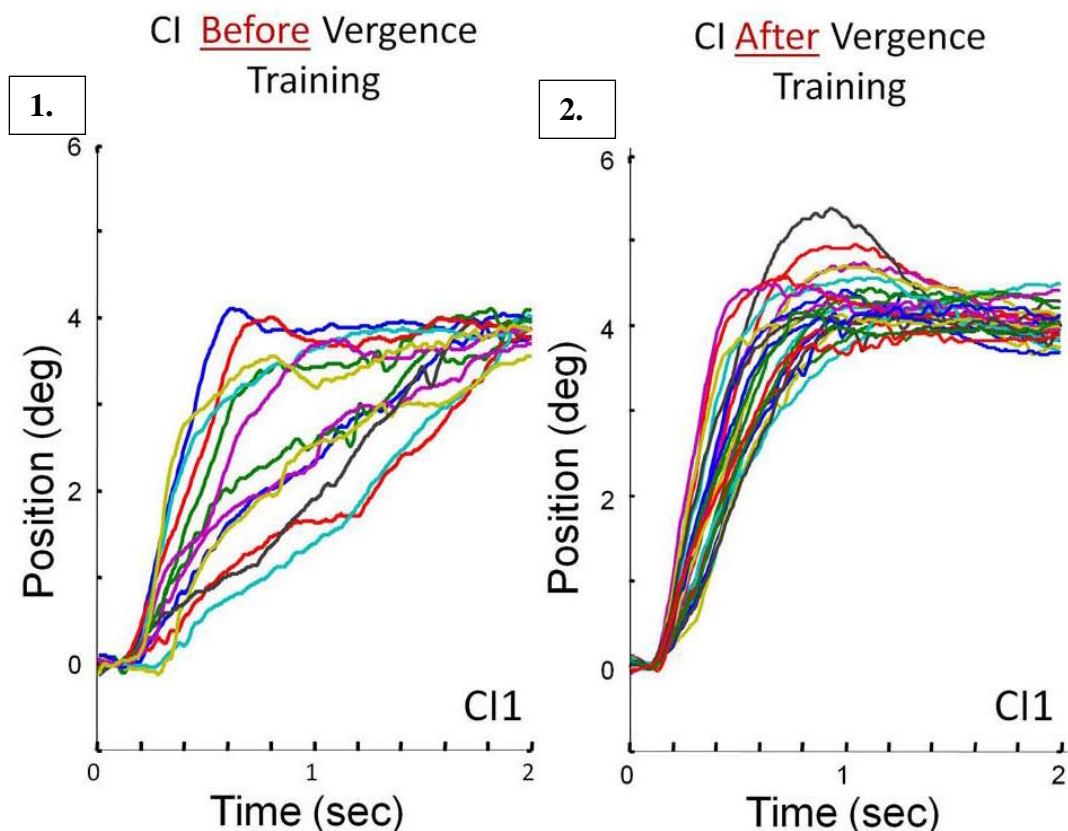
Tracé des trajectoires en convergence et divergence (gris) et variation de la vitesse du mouvement (noir) chez un sujet présentant une insuffisance de convergence avant, 7 jours après la fin et 30 jours après la fin de la réhabilitation. On constate que la variabilité a diminué quand la précision a augmenté. Adapté de Kapoula et al., 2016.

L'amélioration du contrôle des mouvements de vergence semble avoir un impact bénéfique sur la motricité binoculaire. Les travaux de l'équipe d'Alvarez (2010 et 2014) et de Jazwal et al. (2014) se sont focalisés sur les bénéfices que pouvaient apporter une rééducation orthoptique en observant la motricité binoculaire pendant des mouvements de vergence pures ainsi que l'activité neuronale des régions impliquées dans la réponse de vergence grâce à la technologie IRMf. Comme indiqué précédemment, les personnes souffrant d'IC montraient une précision diminuée dans les mouvements de convergence, une latence de mouvement plus longue, une mauvaise coordination des deux yeux et des pics de vitesse diminués en comparaison aux sujets contrôle. Dans l'étude publiée en 2010, l'équipe d'Alvarez montre que le traitement a tout d'abord amélioré les performances des sujets aux tests cliniques (Punctum proximum de convergence et réserves fusionnelles améliorés, exophorie en vision proche diminuée), a fait baisser le nombre et la fréquence des symptômes rencontrés, et a amélioré la vitesse globale des mouvements de vergence (augmentation du pic de vélocité moyen). En association à cela, on constate une activité accrue dans les régions telle que le cortex frontal (DLPFC), pariétal, le cervelet et le tronc cérébral.



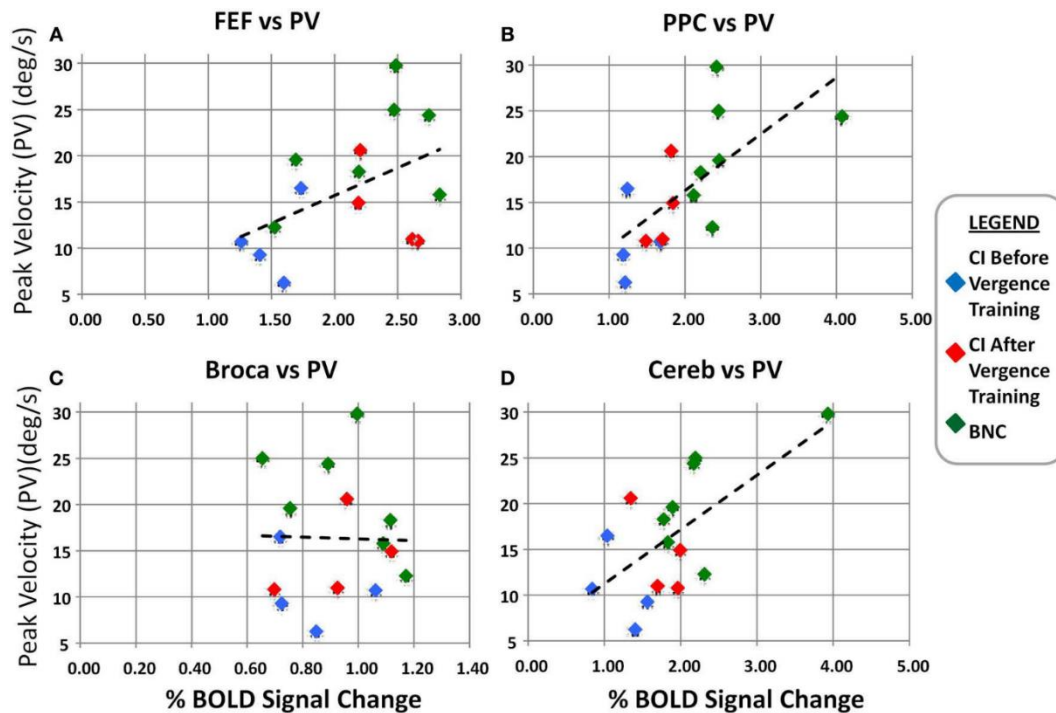
Activité moyenne relevée à l'aide de la technologie IRMf avant le traitement orthoptique (gauche), à la fin du traitement orthoptique (milieu), et 4 à 12 mois après la fin du traitement (droite). D'après Alvarez et al. (2010).

Alvarez et Kim (2013) avancent qu'un des problèmes rencontrés par les sujets atteints de désordres de la vergence réside dans la mauvaise coordination des deux yeux : le mouvement serait plus lent pendant une convergence pure, un des deux yeux ne présentant pas un pic de vitesse suffisamment symétrique à l'autre œil. Suite à un traitement orthoptique, les patients suivis montrent des pics de vitesse beaucoup plus symétriques, témoignage que l'amélioration des capacités de vergence (réserves fusionnelles...) fonctionne en parallèle avec le contrôle dans la coordination des deux yeux, en lien avec l'hypothèse de Yang et Kapoula (2003) et en accord avec la théorie de Hering. Afin d'approfondir ces résultats, l'étude de 2014 se focalise de nouveau sur les bénéfices de la réhabilitation de la vergence. Les mêmes améliorations sont retrouvées concernant les résultats des tests cliniques cités précédemment ainsi qu'au niveau de l'étude des trajectoires des deux yeux : même si la vitesse totale du mouvement est toujours plus lente que chez un sujet normal, elle est beaucoup plus rapide qu'avant la rééducation chez les patients présentant un désordre. Ceci est avant tout expliqué par l'augmentation significative du pic de vitesse moyen pendant le mouvement de convergence pure.



Trajectoire moyenne pendant un mouvement de convergence de 4° chez un sujet présentant une IC avant (1.) et après (2.) la rééducation orthoptique. Le mouvement présente beaucoup moins de variabilité et sa vitesse globale est augmentée. Adapté d'Alvarez et al. (2014).

En association à ces résultats, les auteurs montrent que l'activité des régions corticales comme le FEF, le PPC et le CV est réhaussée significativement après la rééducation, même si cela n'atteint pas les niveaux relevés chez les sujets contrôle. Une étude de corrélation révèle alors que le pic de vélocité pendant un mouvement de convergence de 4° est corrélé significativement et positivement à l'évolution de l'activité relevée (*BOLD signal*) dans le FEF, le PPC et le CV. L'étude de Jazwal et al. (2014) a apporté des résultats similaires concernant les évolutions positives de l'activité cérébrale après une réhabilitation de la vergence chez les sujets atteints d'IC, en lien avec des performances motrices améliorées, mais a en plus révélé des corrélations significatives entre symptomatologie (évaluée avec l'échelle CISS) et évolution de l'activité cérébrale au sein du FEF et du CV. Jusqu'alors, les symptômes relevés avec le CISS avaient montré ne pas être en corrélation avec la sévérité des troubles de vergence, mesurée par rapport aux nombres de résultats cliniques hors norme retrouvés pendant l'examen optométrique (Bade et al., 2013).



Analyse de régression linéaire du pic de vitesse en convergence ($^{\circ}/s$) en fonction de l'évolution du pourcentage du signal BOLD dans les régions corticales comme le champ oculomoteur frontal (FEF, A), le cortex pariétal postérieur (PPC, B), l'aire de Broca (C) et le cervelet (D). On constate que l'évolution d'activité du FEF, du PPC et du CV sont corrélées avec les valeurs de pic de vitesse pendant la convergence. D'après Alvarez et al. (2014).

Concernant ces derniers résultats, les auteurs mettent ici en évidence une activation cérébrale des circuits de la vergence diminuée chez les sujets diagnostiqués avec une IC en comparaison des sujets ne présentant pas de désordre. Cependant, quand la vergence est stimulée et entraînée au travers d'un programme de réhabilitation de 18h effectives, on constate une évolution positive dans l'activité de certaines régions particulières impliquées dans la programmation du mouvement de vergence (ici au sein du FEF, PPC et CV), qui est directement corrélée au pic de vitesse pendant le mouvement. L'entraînement de la vergence se reflète donc au niveau de l'activation cérébrale témoignant de la nature centrale et de la présence de neuroplasticité à la base des améliorations des mouvements de vergence, incluant la coordination binoculaire.

La réhabilitation clinique stimule donc la neuroplasticité. Toutefois, il manque dans ce domaine une approche d'induction de neuroplasticité avec un protocole précis et normé, basé sur la recherche qui distingue clairement la phase et la méthode d'induction de la neuroplasticité, comme par exemple la méthode « *double step* », et les tests d'évaluation (test

de vergence qui seraient différents). Dans notre 3^{ème} étude, nous employons une telle méthode basée sur la recherche pour la réhabilitation de la vergence.

CHAPITRE 7 : Lecture et cognition

L'étude de la lecture est un terrain d'excellence où l'interaction vergence-accommodation-saccade est d'importance majeure, en association avec les processus cognitifs de reconnaissance des mots, d'accès au sens et de maintien de l'attention. La lecture est en effet un domaine complexe, la qualité de la lecture dépend de plusieurs facteurs qu'il est important d'aborder pendant cette partie. Notre démarche reste toutefois de garder une approche oculomotrice, afin d'insister sur l'importance de la qualité de la motricité binoculaire et des relations vergence-accommodation-saccade. Nous nous focaliserons sur l'impact qu'elles peuvent présenter sur la performance de lecture. Pour présenter les caractéristiques oculomotrices de la tâche de lecture, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Rayner et McConkie (1976), Rayner (1986 et 1998), Kirkby et al. (2008) et de Vernet (2009).

7.1 Caractéristiques de la lecture

7.1.2. Les saccades de lecture

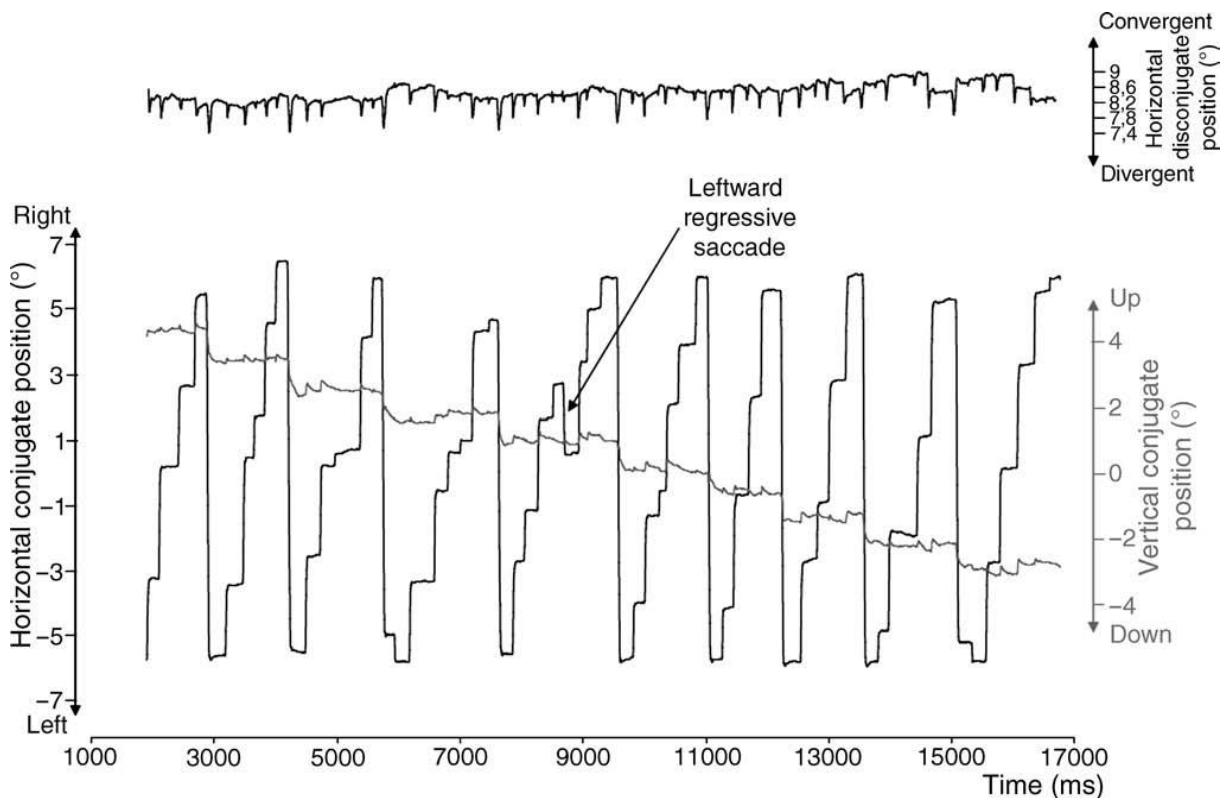
Pour détailler la tâche de lecture, il faut prendre en compte l'architecture de la rétine et l'existence de l'empan perceptuel (Rayner, 1986). L'acuité visuelle maximale est retrouvée uniquement en vision centrale, plus précisément sur une portion qui occupe environ 15 degrés du champ visuel. Le pouvoir de résolution diminue plus on s'éloigne de cet aire central, qui fait de la fovéa la zone de fixation privilégiée. Toutefois, la taille de cette zone est limitée. Parcourir un texte se fait donc par l'intermédiaire des mouvements de saccades entrecoupées de phase de fixation, afin d'amener la zone de vision centrale et de résolution maximale sur l'ensemble du texte. Dans le cas d'un sens de lecture allant de la gauche vers la droite, nous distinguerons 3 grands types de saccades :

- ✓ Les saccades progressives (ou de progression), allant de la gauche vers la droite et permettant d'avancer dans le texte. Leur amplitude représente approximativement de 7 à 9 caractères en moyenne, et leur durée est très similaire chez les différents sujets (20-40ms, O'Regan et Levy-Schoen 1978).
- ✓ Les saccades régressives (ou de régression), allant de la droite vers la gauche sur une même ligne. Leur amplitude est en général inférieure à celle des saccades progressives : les très petites saccades (quelques caractères) sont réalisées pour

améliorer le positionnement de la fixation actuelle, les plus grandes saccades régressives sont réalisées suite à un problème lexical, syntaxique ou sémantique rencontré, et servent à revenir sur un termes déjà traité. Elles représentent environ 15% des saccades effectuées (Rayner et al., 2010 ; Vitu et McConkie, 2000). Leur nombre est un indicateur parmi d'autres de la qualité de la lecture : plus le sujet en accomplit, plus il lui est nécessaire de relire son texte, plus il sera ralenti et moins efficace sera sa lecture.

- ✓ Les saccades de retour à la ligne, oblique et combinant un mouvement du haut vers le bas à un mouvement important de droite à gauche.

Notons ici de plus que, pour conserver une vision simple et nette des mots, l'angle de vergence doit rester stable à la profondeur du texte, tout comme l'ajustement accommodatif doit rester fixe à la distance du texte.



Evolution du signal disconjugué (en haut) et du signal conjugué (en bas, horizontal en noir et vertical en gris) de la position des yeux pendant une tâche de lecture. D'après Vernet (2009)

Un nombre important de modèles ont été conçus dans le but de prédire la trajectoire des yeux pendant la lecture. En effet, les études des mouvements oculaires réalisées objectivement pendant cette tâche ont montré un grand nombre de comportements différents, par exemple des durées de fixation parfois plus longues sur certains mots, des mots sautés ou refixés, ou

des fixations se faisant sur une partie spécifique d'un mot. Les différents modèles élaborés ont tenté d'expliquer certains de ces comportements, selon des approches oculomotrices ou linguistiques. Nous n'aborderons pas la description de ces modèles en détails, et nous focaliserons sur l'étude de la lecture en tant que tâche oculomotrice de succession de saccades et de fixations automatisée.

7.1.2. La phase de fixation : disparité et glissade post-saccadique

Les durées des phases de fixation représentent 90% du temps totale pendant une lecture (Kapoula et Vitu, 2000), avec un intervalle allant de 100 à 500ms (durée moyenne mesurée à 250ms, O'Regan et Levy-Schoen, 1978). C'est pendant cette phase particulière que les processus cognitifs relatifs à l'extraction de l'information visuelle se produiront, plus particulièrement pendant les 48 premières millisecondes de fixation (Vernet et Kapoula, 2009). Un premier facteur, linguistique, va déterminer la durée de la fixation, qui sera dépendante de la prédictibilité du mot fixé dans le texte (Ehrlich et Rayner, 1983), de sa fréquence (Rayner et Duffy, 1986) et de sa longueur (Juhasz et al., 2008). Toutefois, les yeux ne sont pas pour autant immobiles pendant cette période.

En introduisant leurs caractéristiques, nous avons constaté que la coordination binoculaire des saccades n'est pas parfaite. Les études portant sur les saccades de lecture montrent qu'une disconjugaison est aussi retrouvée pendant cette tâche (Liversedge et al., 2006 ; Yang et Kapoula, 2003 ; Vernet et Kapoula, 2009). Cette disconjugaison est responsable de la disparité de fixation retrouvée en début de fixation (Liversedge et al., 2006 ; Heller et Radach, 1999). Cette erreur d'alignement finale a été mesurée dans plusieurs études. Les résultats de Kliegl et al. (2006) montrent sur un large échantillon que les deux yeux fixent le même mot dans 77% des cas, mais que 41% des fixations ne sont pas alignées sur la même lettre. Toutefois, les auteurs ne retrouvent pas d'impact sur la durée de fixation, ce qui suggère que l'extraction de l'information visuelle n'est pas déstabilisée. Pour Blythe et al. (2006), 85% des fixations sont alignées sur le même mot, mais cette part est moins fréquente sur les mots courts, suggérant que ces derniers sont plus régulièrement sautés. Enfin, Liversedge et al. (2006) ont montré que dans 47% des fixations, l'erreur finale égalait ou dépassait la taille d'un caractère. Ils retrouvent 53% de fixations alignées, 8% de disparités croisées et 39% décroisées. Nuthmann et Kliegl (2009) retrouvent aussi des erreurs d'alignement en début et en fin de fixation, plus souvent croisées que décroisées cette fois. Si leur méthodologie était différente des autres études citées, les auteurs suggèrent que le sens de la disparité de fixation

est influencé par la configuration des cibles, donc des mots fixés. L'alignement stricte des axes visuels sur le mot d'intérêt n'est donc pas toujours observé dans le comportement oculomoteur en lecture, cela sans pour autant que la diplopie soit expérimentée.

Si la flexibilité apportée par les aires de Panum, va permettre de maintenir une vision simple des mots fixés malgré cette erreur d'alignement en fin de saccade, elle n'est parfois pas suffisante quand la disparité de fixation est d'une taille trop importante. Dans les études citées précédemment, une disparité moyenne comprise entre 0.24° et 0.65° était mesurée, soit 15 à 40 minutes d'arc environ, ce qui dépasse les valeurs habituellement enregistrées concernant la taille des aires de Panum en vision centrale. Toutefois, des phénomènes d'adaptation sensorielle semblent permettre d'étendre ces aires (London et Crelier, 2006). De plus, dans les premiers instants de la fixation, un mouvement lent qualifié de « glissade » a été observé dans plusieurs études (Vernet et al., 2009 ; Jainta et al., 2010 ; Liversedge et al., 2006). Cette glissade représente en réalité un mouvement de vergence visant à réaligner les axes visuels sur la cible, et une corrélation directe a été retrouvée entre l'amplitude de la disconjugaison mesurée en fin de saccade et l'amplitude de ce « *drift* » : plus la disconjugaison des saccades était importante, plus le glissement tendait à corriger cette disconjugaison lors de la fixation qui la succédait (Vernet et al., 2009 ; Jainta et al., 2010). Partant de ce constat et de celui de Liversedge et al. (2006), qui ont montré un allongement de la durée de fixation plus le drift était important en amplitude, la vitesse de lecture ainsi que la vitesse de traitement des données visuelles pendant chaque fixation peuvent donc être indirectement impactées par une mauvaise coordination binoculaire des saccades.

Un nombre important de facteurs linguistiques et visuels vont moduler le moment de la programmation et la localisation exacte de la saccade suivante (Rayner, 1998), sachant que certains d'entre eux ont déjà une incidence sur la durée de fixation (Clifton et al., 2016). Toutefois, un mouvement de saccade doit être programmé pour être exécuté, cette programmation est réalisée à la fin de la fixation. Les modèles cherchant à prédire les mouvements oculaires en lecture ne sont pas toujours en accord sur ce point, mais il apparaît que la saccade suivante puisse être programmée et accomplie alors que le traitement de l'extraction de l'information visuelle n'est pas entièrement terminé.

7.1.3. Evolution de la qualité de la lecture avec l'âge

La vitesse de lecture est une première mesure permettant d'évaluer la qualité de la lecture, et de nombreux tests étalonnés reposent sur ce principe, comme par exemple avec le test de l'Alouette (Debray et al., 1972 ; Lefavrais, 1967 ; Sprenger-Charolles et al., 2009), utile par exemple à l'évaluation de l'âge lexique. La durée des fixations détermine majoritairement le temps global de lecture, et il apparaît que ce sont des facteurs relatifs à la prédictibilité, à la fréquence et à la longueur des mots fixés qui influencent directement le temps de fixation.

Plusieurs études se sont focalisées sur la motricité en lecture chez les enfants et chez les adultes. De nombreux paramètres évoluent avec l'âge et l'expérience visuelle, à commencer par celui de l'empan perceptuel en lecture. L'étude de Rayner (1986) montre que celui-ci est de taille plus réduite chez les enfants par rapport aux adultes.

Les résultats de McConkie et al. (1991) et de Seassau et Bucci (2013) sont dans la lignée des précédents. Les auteurs ont montré que les saccades progressives des enfants étaient de plus petite taille et de ce fait, plus nombreuses que celles des adultes. De plus, les durées de fixations étaient elles aussi plus longues que celles des adultes, et le nombre de saccades régressives était plus important chez les enfants. Ces différences peuvent d'abord s'expliquer par l'immaturation des processus cognitifs de lecture, extrêmement dépendant de l'expérience. Les progrès linguistiques réalisés tout au long de la scolarité vont être liés à la diminution des durées de fixation et du nombre de saccades de régression. L'augmentation de l'empan perceptuel permettra, à termes, de réaliser un nombre de saccades moins important et de plus grande taille. La vitesse de lecture va de ce fait augmenter.

Concernant la coordination binoculaire des saccades, les résultats de Yang et Kapoula (2003), de Fioravanti et al. (1995) et de Seassau et Bucci (2013) ont montré que la disconjugaison des saccades en lecture était d'amplitude plus importante chez les enfants que chez les adultes, suggérant l'existence d'un apprentissage de la coordination binoculaire basé sur la neuroplasticité, comme développé précédemment. L'évolution des processus cognitifs de reconnaissance des mots et d'accès au sens se fait donc de concert avec l'amélioration de la coordination binoculaire des saccades. Il en résulte une augmentation de la vitesse de lecture avec l'expérience : les études portant sur les tests de lecture évaluant l'âge lexique (Debray et al., 1972 ; Lefavrais, 1967 ; Sprenger-Charolles et al., 2009) montrent en effet un nombre

d'erreurs moins importants et une vitesse de lecture accélérée avec l'âge. La qualité de la lecture dépend donc de plusieurs facteurs, qu'ils soient linguistiques ou visuomoteurs.

Dans le cadre de notre travail, nous avançons l'hypothèse qu'un désordre de la vergence présent pendant l'enfance puisse perturber l'apprentissage de la lecture et ralentir l'acquisition correcte de ses processus. Par la suite, nous allons faire une revue des études traitant des désordres de la coordination des saccades en lecture en lien avec les dysfonctionnements de la synergie vergence-accommodation-saccade.

7.1.4 Qualité de la vergence et lecture

Les études cliniques présentées dans le chapitre 4 traitaient d'un potentiel impact néfaste d'un dysfonctionnement A-V sur la qualité de la lecture. Toutefois, ces études ne tenaient pas compte de la motricité binoculaire, et ne pouvaient ainsi correctement analyser les mécanismes responsables, faisant essentiellement référence à la symptomatologie visuelle pour justifier l'existence de ce lien.

Les problèmes de coordination binoculaire des saccades sont retrouvés chez les sujets diagnostiqués avec des dysfonctionnements A-V, plus particulièrement dans le cas des insuffisances de convergence. Or, les saccades représentent l'essentiel des mouvements effectués en lecture, mouvements pendant lesquels l'angle de vergence et l'ajustement accommodatif doivent rester stables. Les études déjà présentées précédemment montrent que la qualité de la vergence a un impact direct sur la coordination des saccades. Yang et Kapoula (2003) ont d'abord montré une disconjugaison plus importante des saccades en vision proche qu'en vision lointaine chez les enfants, témoignant de l'implication de la maturité du contrôle de la vergence dans la coordination des saccades. Des résultats similaires, concernant cette fois les saccades en lecture, ont été montrés par Blythe et al. (2006) : l'amplitude de la disconjugaison au début et à la fin des fixations était plus importante chez les enfants que chez les adultes. Les études de Bucci et al. (2004, 2006, 2011) se focalisant sur des enfants diagnostiqués avec des troubles de la vergence après un bilan orthoptique montrent ici encore une disconjugaison des saccades d'amplitude plus importante. L'étude de Bucci et al. (2011) a retrouvé des gains plus faibles dans les mouvements de vergence et des latences allongées pour la plupart des mouvements chez les sujets présentant un dysfonctionnement en comparaison des sujets sains. Ces résultats suggèrent un déficit central dans la programmation

et le déclenchement des mouvements de saccades et de vergence. La qualité altérée de la réponse de vergence serait aussi en lien avec un déficit dans la commande centrale de vergence intra-saccadique qui aide à réduire la disconjugaison de la saccade en temps normal.

Toutefois, les études se focalisant sur la coordination des saccades pendant la lecture et sur un potentiel impact néfaste d'un dysfonctionnement A-V sont rares. Dans une première étude de Bassou et al. (1992) réalisée sur des enfants normaux-lecteurs de 10 ans, les auteurs mettent en exergue l'incidence du positionnement phorique sur la lecture : les enfants exophoriques lisent moins vite que les enfants esophoriques. Additionnellement, les enfants présentant une insuffisance de convergence, au nombre de 2 dans cette étude, lisaient à la fois moins vite mais présentaient aussi un problème de coordination pendant les phases de saccades et de fixation, avec un des deux yeux dérivant régulièrement. Cette première étude nous renvoie à l'évaluation de la vitesse de lecture comme critère pour apprécier sa qualité. Des résultats similaires sont retrouvés dans des études plus récentes, comme celle de Hirota et al. (2016) où une population de jeunes adultes présentant un trouble de la vergence type insuffisance de convergence – exotropie intermittente a été comparée à une population contrôle du même âge. Ici encore, la disconjugaison pendant les saccades de lecture était significativement plus importante que chez les sujets sains, plus particulièrement lors des grandes saccades de retour à la ligne, et selon les auteurs, cette mesure était en relation directe avec le nombre d'erreur de relecture d'une même ligne, là encore significativement plus important que chez le groupe contrôle (Cooper et Jamal, 2012). Une vitesse de lecture significativement plus faible a aussi été retrouvée chez des adolescents présentant des troubles de vergence (Dusek et al., 2010 ; Goss et al., 2007) en comparaison à un groupe contrôle.

Les fixations représentent 90% du temps passé pendant la lecture, et leur durée détermine donc majoritairement la vitesse du lecteur. Du point de vue de la compréhension et du traitement cognitif de la lecture, la durée des fixations est directement influencée par les caractéristiques linguistiques, syntaxiques et sémantiques du mot fixé (Rayner, 1998 ; Clifton et al., 2016). Toutefois, c'est aussi pendant cette même phase de fixation que la glissade post-saccadique vient corriger l'erreur d'alignement (disparité de fixation) résultante liée à la disconjugaison de la saccade (Vernet et Kapoula, 2009) et que la programmation de la saccade suivante se produit. Cet aspect moteur n'est que très peu abordé dans la littérature. Cependant, une mauvaise coordination binoculaire pendant les saccades de lecture est liée directement à une erreur d'alignement finale qui entraîne des mouvements compensatoires

pendant la fixation. L'amplitude de la disconjugaison peut donc avoir un impact sur la qualité de la lecture. Nous faisons l'hypothèse que la capacité à corriger rapidement et avec précision l'erreur d'alignement des axes visuels en fin de saccade améliore la qualité de lecture, accélère l'extraction des informations visuelles et permet d'augmenter la vitesse de traitement.

Si le lien entre dysfonctionnement A-V et difficultés de lecture est beaucoup discuté dans la littérature, les études associant réhabilitation de la vergence et amélioration de la qualité de lecture nous permettent d'aborder cette hypothèse sous un autre angle. Une première étude de Dusek et al. (2011) a d'abord montré qu'en plus des performances améliorées concernant l'amplitude d'accommodation, les réserves fusionnelles et la flexibilité accommodative, les sujets diagnostiqués pour une IC présentaient en plus une vitesse de lecture accélérée après la rééducation. De plus, l'amélioration du traitement de l'information visuelle, avec la diminution du nombre d'erreurs commises pendant la lecture a aussi été constatée. Cette étude n'approfondit cependant pas les mécanismes impliqués dans ces améliorations, en particulier concernant la motricité binoculaire. L'étude de Gaertner et al. (2013), plus récente, est revenue sur ce point en montrant que la disconjugaison des saccades de lecture était diminuée après une rééducation orthoptique, en association avec un gain significatif en termes de réserves fusionnelles. La coordination des saccades était donc meilleure après une réhabilitation de la vergence chez des enfants présentant à l'origine des dysfonctionnements de la vergence. Toutefois, les durées de fixation mesurées avant et après la réhabilitation étaient similaires. Les textes étudiés étaient cependant très courts, et il nous est possible d'émettre l'hypothèse qu'en utilisant un texte plus long, des résultats comme ceux de Dusek et al. (2011) seraient retrouvés. De plus, ces deux études se sont focalisées sur des populations d'enfants et des adolescents. Or, la prévalence des dysfonctionnements A-V reste importante chez les jeunes adultes, pour lesquels des études similaires manquent aujourd'hui.

La réhabilitation de la vergence entraîne des bénéfices sur plusieurs points, entre autres la diminution voire la suppression de la symptomatologie, l'amélioration des capacités de vergence et d'accommodation, l'amélioration dans la programmation et l'exécution des mouvements de vergence et le rehaussement de l'activité corticale des régions responsables de ces réponses. Toutefois, les études manquent pour expliquer les mécanismes impliqués dans l'augmentation de la vitesse de lecture retrouvée par Dusek et al. (2011). L'étude plus approfondie de la motricité binoculaire en lecture avant et après la rééducation permettra, à

notre sens, d'isoler si l'amélioration de la coordination des saccades peut avoir un impact positif sur la qualité de la lecture.

Dans le cadre de notre travail, nous nous positionnerons sur une approche oculomotrice afin d'isoler avec plus de précisions les mécanismes interagissant dans ces processus. Toutefois, il nous faut au préalable aborder une dernière partie dans notre cadre théorique : celle des processus cognitifs responsables de l'attention et des fonctions exécutives cognitives. En effet, ces derniers font appel au même réseau de régions corticales que les processus stimulés par la lecture. De plus, l'introduction du test neuropsychologique de Stroop nous permettra d'aborder la notion de charge cognitive en lien avec les processus visuomoteurs.

7.2. Cognition et attention, généralités et aires corticales impliquées

Parmi les différents symptômes rapportés par les sujets présentant des dysfonctionnements A-V, les difficultés à maintenir une attention focalisée se retrouvent fréquemment et font l'objet d'une question caractéristique dans les différentes échelles de dépistage (CISS, Rouse et al., 2004 ; COVD QOL, Vaughn et al., 2006 et Abu Bakar et al., 2012). De plus, le contrôle de l'attention est une caractéristique indispensable pendant la lecture. Toutefois, son déploiement fait aussi référence aux fonctions cognitives exécutives, et les mécanismes qui en sont responsables font appel à un réseau cortical particulier, spécificités qui ne sont que très rarement abordées dans la pratique clinique. Un des objectifs de cette thèse étant aussi d'approfondir l'étude des interactions possibles entre les fonctions visuomotrices et la cognition, ce présent chapitre va nous permettre d'aborder les processus cognitifs responsables du contrôle attentionnel et des fonctions exécutives en détails afin de mieux cerner les aires corticales impliquées.

Bien qu'ici, nous ne cherchons pas à identifier la géographie corticale ou adopter une approche de localisation cérébrale, il est important de noter que la motricité oculaire dans son ensemble et les fonctions cognitives exécutives sont imbriquées, car partageant des structures communes les contrôlant.

7.2.1 Attention endogène : implication d'un réseau cingulo-fronto-pariétal

Les recherches concernant l'attention ont été nombreuses ces cinquante dernières années. Cependant, il est important ici de bien définir de quelle forme d'attention nous parlons. Dans le cadre de notre travail, nous exposerons plus particulièrement le processus d'attention défini

par la capacité d'un individu à se focaliser exclusivement sur une tâche ou un objet précis en résistant aux multiples distractions ou interférences. Cette nuance est importante car il existe de nombreux modèles pour définir le déploiement attentionnel. En ce qui concerne la lecture, l'apprentissage et les performances scolaires ou cognitives, c'est bien le processus actif de l'attention qui est mis en jeu, celui qui permet à l'individu de se concentrer sur un élément bien particulier de son environnement en résistant aux distractions extérieures, en étant capable de filtrer les informations qui l'intéressent parmi une multitude et en maintenant bien entendu son attention de façon prolongée. De cette façon, la mémorisation des informations pertinentes sera facilitée, de même que la compréhension.

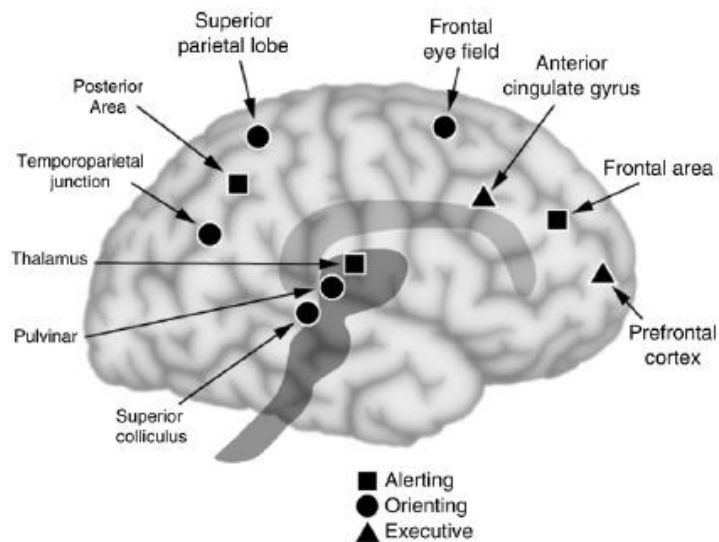
Schneider et Shrifin (1977), mais aussi Posner et Raichle (1994), ont distingué l'attention de type exogène, relative à l'attraction provoquée par un élément saillant ou un évènement soudain du monde extérieur et de ce fait automatique ou involontaire, et l'attention de type endogène, qui elle correspond à un processus guidé de l'intérieur, volontaire, et qui maintient la focalisation de l'attention dans l'objectif d'atteindre un but précis.

De nombreux modèles ont été proposés concernant le fonctionnement du contrôle de l'attention. Pour commencer, Mesulam (1981 et 1990) présente le fonctionnement de l'attention sous forme d'un réseau composé de différentes aires cérébrales qui interagiraient entre elles de façon dynamique : le cortex pariétal supérieur (SPC), le cortex cingulaire et le cortex préfrontal, plus particulièrement la région de l'aire oculomotrice frontale (« Frontal Eye Field », FEF). Ces régions spécifiques auraient chacune leur responsabilité propre dans le maintien du processus attentionnel et seraient sous l'influence des structures réticulées qui modèleraient le niveau d'éveil. Interconnectées, elles présentent aussi des connexions vers des structures sous corticales (Striatum, Pulvinar et Colliculus supérieur), les régions inféro-temporales (voie du « quoi ? ») et le cortex orbito-frontal. La région pariétale, qui d'habitude est responsable de la localisation des stimuli visuels et aussi appelée voie du « où ? », permettrait la cartographie interne de l'environnement extérieur (représentation sensorielle), la région préfrontale coordonnerait les programmes moteurs (représentation motrice) et le gyrus cingulaire modèlerait l'attribution spatiale de l'attention (motivation).

LaBerge (1998) a proposé un circuit triangulaire de l'attention, impliquant les régions préfrontales (gyrus cingulaire, cortex dorsolatéral, et aires motrices supplémentaires), les régions corticales postérieures (incluant des régions du lobe temporal, pariétal et occipital) et

une partie du Thalamus (Pulvinar). Selon lui, ces régions corticales sont susceptibles de fonctionner tour à tour de façon « automatique », (l'activation des régions postérieures serait alors de faible degré), ou de façon « contrôlée », par exemple face à des situations inhabituelles qui nécessiteraient un traitement attentionnel intense, le Pulvinar jouant alors un rôle principalement dans le « rehaussement » d'activation des régions postérieures, et ce sous l'impulsion des régions préfrontales, qui seraient responsables de l'augmentation de la saillance de l'objet et du maintien de l'attention sur cette représentation utile.

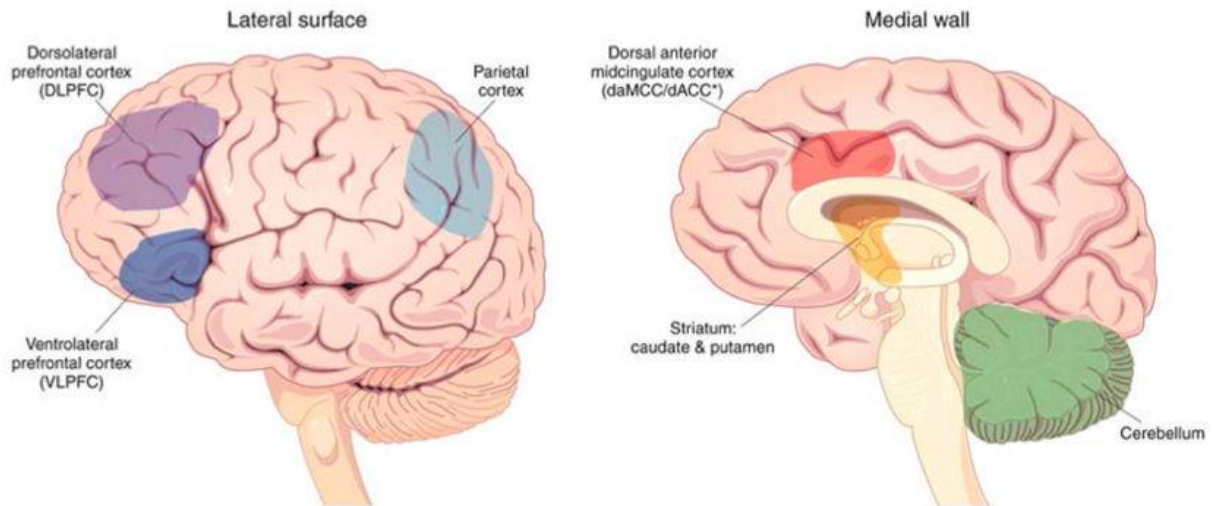
A travers différentes études (Posner et Petersen, 1990; Posner et Rothbart, 1991; Posner, 1994) Posner et ses collaborateurs ont étudié les processus attentionnels, s'appuyant sur des études réalisées sur des animaux ainsi que sur des patients cérébrolésés, et se focalisant surtout sur les processus d'orientation visuo-spatiale de l'attention. Ils décrivent de leur côté trois structures corticales qui seraient chacune à la base d'un système présentant des fonctions particulières : un système de maintien d'attention (réseau de vigilance), responsable du maintien de la vigilance et du traitement des signaux à priorité élevée, impliquant le locus coeruleus, plus particulièrement dans l'hémisphère droit (Pardo et al., 1991), et ses connexions avec le Colliculus et les régions pariétales ; un système d'orientation attentionnelle (réseau postérieur), responsable de la localisation visuo-spatiale et de l'orientation de l'attention. Il implique le cortex pariétal (par exemple dans le désengagement de l'attention), le colliculus supérieur (mouvement de l'attention vers la nouvelle cible) et le pulvinar (engagement de l'attention sur la nouvelle cible) ; un système exécutif (réseau antérieur), responsable de l'orientation endogène de l'attention, de la détection et la sélection de la cible, de la résolution de conflit et de l'inhibition de réponses pré-apprises. Il impliquerait le gyrus cingulaire et l'aire motrice supplémentaire.



Aires corticales impliquées dans les 3 systèmes d'attention décrits par Posner, d'après Posner et al., 2006.

Van Zomeren et Brouwer (1994) ont proposé un modèle qui prendrait en compte les différents aspects de l'attention en les classant selon 2 domaines : d'une part l'intensité, qui évaluerait la quantité de ressources attentionnelles réservées à une tâche, et d'autre part la sélectivité, qui définirait la nature de la sélection des informations dans la tâche concernée. Ils font la distinction entre une capacité d'attention phasique, dite d'alerte, lorsque le sujet doit par exemple mobiliser rapidement ses ressources attentionnelles, et une capacité d'attention soutenue, qui maintiendrait l'attention sur une tâche prolongée.

Si ces différents modèles sont toujours utilisés aujourd'hui, les études utilisant la neuroimagerie cérébrale ont par la suite permis de localiser plus précisément les différentes régions corticales impliquées dans le mécanisme endogène attentionnel. Un véritable réseau « cingulo-fronto-pariétal » est aujourd'hui désigné comme responsable du déploiement de l'attention et du contrôle de la cognition.



Régions corticales et sous corticales impliquées dans les processus de contrôle moteur, de l'attention et de la cognition. D'après Bush (2011).

Ce réseau de contrôle attentionnel et cognitif regroupe les régions du cortex cingulaire antérieur dorsal (daMCC/dACC), du cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC), du cortex préfrontal ventrolatéral (VLPFC) et du cortex pariétal. Ces régions travaillent de concert avec d'autres régions comme le Striatum et le cervelet pour assurer les processus de contrôle moteur, cognitif et de l'attention (Goldman-Rakic, 1988 ; Morecraft et al., 1993 ; Cabeza et Nyberg, 2000 ; Duncan et Owen, 2000).

L'imagerie cérébrale a confirmé le rôle exécutif que jouaient certaines aires du cortex préfrontal dans le contrôle de l'attention, et ainsi que celui de son orientation pour certaines aires du cortex pariétal (Wang et al., 2010). En effet, les aires frontales présentent un rôle de contrôle exécutif dans le processus d'attention : le cortex préfrontal dorsolatéral apparaît comme un système intégrateur, il reçoit les informations des autres structures corticales et va initier et diriger la réponse interne (Brass et al., 2005 ; Mansouri et al., 2009; Miller et Cohen, 2001), alors que le cortex cingulaire aurait une responsabilité dans la gestion des conflits concernant les tâches à accomplir (Botvinick et al., 2001, 2004; Carter and van Veen, 2007; Ridderinkhof et al., 2004). Les aires motrices et pré-motrices supplémentaires seraient sollicitées quant à elles dans la sélection et l'exécution des réponses (Lau et al., 2006; Nachev et al., 2008; Rushworth et al., 2007). Le cortex pariétal postérieur (PPC) va de son côté moduler l'orientation attentionnelle et préparer la cartographie spatiale de la réponse au stimulus (Coulthard et al., 2008; Scherberger et Andersen, 2007). Toutefois, la nature des tâches cognitives pendant lesquelles ces mesures ont eu lieu étaient très variées. Nombreuses aussi sont les études qui ont été menées sur des primates et pour lesquelles le processus

d'attention visuelle a plus été étudié que celui à proprement parler de contrôle attentionnel et cognitif à la fois.

7.2.2. Mécanisme d'attention visuelle

Si l'on se focalise sur l'orientation et le maintien de l'attention au niveau visuel uniquement, il peut lui aussi s'effectuer de deux façons : par démarche ascendante (« bottom-up ») et est relatif à l'attention exogène, involontaire et guidée par la détection ou saillance d'un stimulus extérieur ; ou par démarche descendante (« top-down ») et dans ce cas est relatif à un phénomène volontaire (attention endogène). Les circuits corticaux impliqués sont très similaires à ceux présentés précédemment.

Le Colliculus supérieur (SC) apparait comme une première structure en lien avec le processus d'attention visuelle. Revenant des connexions directement depuis la rétine ainsi que des feedbacks de l'aire V1, le SC permet une première représentation d'éléments visuels saillants (Fecteau et Munoz, 2006). Essentiel à l'élaboration d'une carte de priorité attentionnelle, probablement partagée avec les aires du champ oculomoteur frontal (FEF, Thompson et al., 2005), intrapariétale latérale (LIP, Bisley et al., 2010) et les régions du cortex visuel via des afférences directes, ainsi qu'avec les régions comme le Pulvinar (Shipp, 2003), il est vraisemblablement un élément majeur d'un premier réseau de communication de signaux relatifs à la direction de l'attention.

Plusieurs études portant sur les primates et les humains montrent l'existence de connexions avec les Corps Genouillés Latéraux. Ainsi, l'information visuelle serait déjà sujette à modulation, par exemple dans l'amélioration ou la suppression de certains stimuli (McAlonan et al., 2008 ; O'Connor et al., 2002 ; Saalman et al., 2009).

L'aire intrapariétale latérale (LIP) est connue pour son implication dans les processus d'attention et de comportement oculomoteur (Gottlieb, 2007 ; Bisley et al., 2010). Cependant, il est important de noter que le LIP peut à la fois répondre à des stimulations de saillance comme à des stimulations relatives au processus endogène d'attention. Ainsi, cette structure particulière qui communique avec d'autres régions comme le Colliculus supérieur, est directement impliquée dans l'élaboration d'une carte de priorité attentionnelle, mais aussi code vraisemblablement pour l'objet de priorité dans le processus attentionnel (Ungerleider, 2008 ; Bisley et al., 2003).

Le champ oculomoteur frontal (« Frontal Eye Field », FEF) est lui aussi impliqué dans le processus d'attention visuelle, comme ses réponses à des stimuli de saillance (attention exogène). De plus, il a lui aussi sa part dans l'élaboration de la carte de priorité attentionnelle (Thompson et al., 2005) en lien avec le LIP et le SC, et il représente une structure importante, étant donné ses connexions avec le SC, dans les comportements oculomoteurs en lien avec l'attention (Lamme et Roelfsema, 2000 ; Monosov et al., 2008).

Le cortex préfrontal (PFC) enfin, va aussi avoir un rôle majeur dans l'activation du processus d'attention visuelle. Il s'avère être directement impliqué dans la sélection de cible sur laquelle est portée l'attention (Buschman et Miller, 2007 ; Lebedev et al., 2004).

7.2.3. Orientation de l'attention et orientation du regard : un fonctionnement similaire ?

Le réseau fronto-pariétal décrit précédemment et impliqué dans l'orientation de l'attention présente des homologues avec le réseau impliqué dans l'orientation du regard, en particulier concernant le contrôle des mouvements de saccade. Rizzolatti et al. (1987) ont été les premiers à décrire de la théorie pré-motrice de l'attention au niveau visuel. Selon les auteurs, l'orientation endogène de l'attention est sous-produit de la préparation du mouvement de saccade. En utilisant une tâche de détection avec indicage endogène, les auteurs ont mis en évidence le fait que la saccade était facilitée par l'attention. Lors de leur expérience, lorsqu'un indice non valide apparaissait, l'effet négatif qu'il produisait était plus important lorsque la cible finale et cet indice étaient séparés par un « méridien », c'est-à-dire une limite imaginaire horizontale ou verticale qui passait par le point de fixation de base. Mais il est un fait que dans la vie de tous les jours, nous effectuons presque toujours des mouvements combinés de saccade et de vergence, et par conséquent la véritable base motrice de l'attention serait un mouvement combiné saccade-vergence-accommodation. La préparation d'un mouvement des yeux, qu'il concerne un changement pur de direction mais aussi de profondeur, est un phénomène complexe faisant intervenir différentes aires corticales, impliquées elles aussi dans le processus d'attention. La question d'une éventuelle interaction possible de ces deux mécanismes peut donc légitimement se poser.

D'un point de vue neuro-anatomique, le colliculus supérieur semble avoir une importance centrale dans le phénomène d'attention. Recevant des afférences préfrontales ainsi que pariétales, il est donc impliqué dans le traitement de données spatiales endogènes et exogènes relatives à l'orientation de l'attention. De surcroît, il est aussi actif dans l'exécution des mouvements de saccades et de vergence comme cité précédemment, au même titre que les aires cérébrales PEF et FEF respectivement des lobes pariétaux et frontaux (Corbetta et al., 1998 ; Nobre et al., 2000). Oculomotricité et attention partageant des réseaux similaires, les interactions entre ces processus méritent un véritable approfondissement. Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes plus particulièrement focalisés sur les désordres moteurs susceptibles d'être rencontrés concernant les mouvements de saccades et de vergence. Si une fragilité vient perturber le processus moteur dans son fonctionnement, la question de l'impact qu'elle pourrait avoir sur le processus attentionnel se pose en effet. En étudiant le comportement oculomoteur dans des tâches visuelles nécessitant le maintien de l'attention ainsi que l'emploi de fonctions exécutives cognitives particulières, il sera sans doute possible d'obtenir une première réponse.

7.2.4. Fonctions exécutives cognitives : bases de la cognition

Les fonctions exécutives cognitives sont un terme général regroupant les processus cognitifs d'intégration de haut niveau permettant d'adapter son comportement à une situation inhabituelle (Lezak, 1982). Cette gamme de fonctions comprend par exemple la capacité à formuler des objectifs, à initier des comportements appropriés, à anticiper les conséquences de ses actions, à planifier et organiser ses agissements en fonction des informations spatiales, temporelles, d'actualité ou en respectant une certaine logique, à rester attentif et concentré, ou encore à adapter son comportement pour s'accommoder d'une tâche spécifique ou d'une situation particulière. En d'autres termes, la fonction principale de ces « processus contrôlés » (Shriffin et Schneider, 1977), en opposition à des processus automatiques, est de permettre à un individu de s'adapter à une situation nouvelle avec aisance, là où les habitudes « de routines » ne peuvent plus suffire (Seron et al. 1999). Ces fonctions exécutives sont souvent qualifiées de « froides », dans le sens où elles font référence à des processus cognitifs ne faisant pas ou très peu intervenir de composante émotionnelle (Grafman & Litvan, 1999) et étant plus construites sur des bases logiques. Elles interviennent surtout dans des situations non routinières, qui nécessitent une nouvelle approche de la situation et de l'environnement par l'individu.

De façon exhaustive et à partir des différentes études réalisées (Stuss & Benson, 1986; Shallice, 1988; Damasio, 1995 ; Stuss, Shallice, Alexander, & Picton, 1995 ; Grafman & Litvan, 1999 ; Burgess, Veitch, de lacy Costello, & Shallice, 2000, Burgess & Simons 2005, Espy 2004, Miller & Cohen 2001), nous pouvons faire la liste des différentes fonctions exécutives cognitives qui suit :

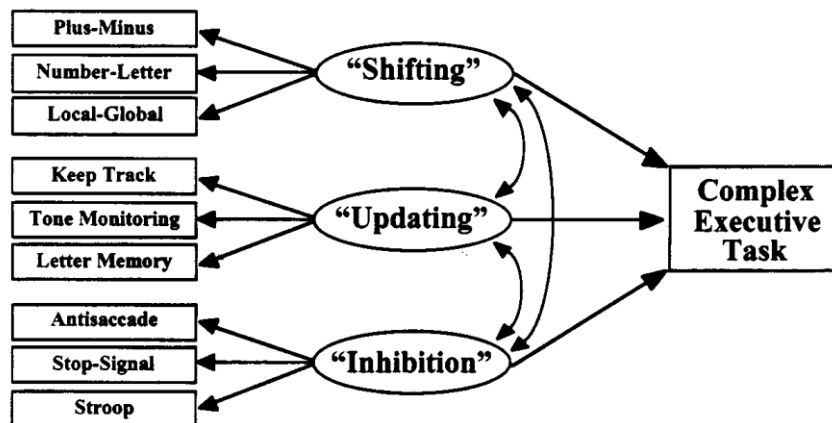
- ✓ La planification: permet la programmation et le séquençage des priorités concernant les différentes étapes nécessaires à la mise en place de la stratégie
- ✓ La stratégie: composante permettant de décider des moyens les plus adéquats pour résoudre le problème ou atteindre l'objectif visé
- ✓ Le maintien de l'attention: permet de maintenir en activation le plan jusqu'à sa réalisation complète
- ✓ La flexibilité mentale: cette composante est nécessaire pour la modification en temps réel du plan d'action en fonction des contraintes ou situations environnementales spécifiques
- ✓ L'inhibition : nécessaire pour sélectionner les informations utiles, résister aux distracteurs et renoncer à tout comportement illogique, inadapté ou automatique

Cet éventail de fonctions très diversifiées permet à un individu de gérer les informations qu'il reçoit du monde extérieur afin d'atteindre ses objectifs ou ses buts tout en s'adaptant à son environnement et à sa situation : maintenir son attention, savoir sélectionner les informations importantes parmi une multitude, mettre à jour sa mémoire et l'utiliser à bon escient, être vigilant et flexible, inhiber certaines réactions ou réflexes ou organiser ses pensées et planifier en conséquence ses actions sont en effet nécessaires au quotidien pour s'adapter à la plupart des situations, correctement interagir socialement ou encore résoudre des problèmes plus complexes.

Toutefois, face à la grande diversité de ces fonctions et étant donné les interactions que certaines peuvent avoir entre elles, dans leur mécanisme comme dans les régions corticales impliquées, Miyake et al. (2000) ont recherché si les fonctions exécutives étaient elles-mêmes organisées spécifiquement, et s'il fallait les considérer comme issues d'un processus unitaire ou au contraire s'il était possible de les segmenter. Miyake et al. (2000) ont proposé l'existence de trois fonctions principales dites « de cœur », regroupant l'inhibition, la mise-à-jour (« updating ») et la flexibilité mentale (« shifting », voir aussi Lehto et al., 2003). Ce

modèle est très largement utilisé aujourd’hui. C’est en effet à partir de ces trois composantes principales que les processus de plus haut niveau comme la planification, la résolution d’un problème ou l’élaboration d’une stratégie seraient basés (Collins & Koechlin 2012, Lunt et al. 2012).

Dans leur expérimentation, Miyake et al. ont décidé de n’utiliser que 3 tests neuropsychologiques différents par processus pour étudier les relations entre chacune des fonctions exécutives choisies, par le biais d’une analyse de variables latentes. Ainsi, ils ont réussi à démontrer sur 137 sujets que les trois variables latentes, correspondant à l’inhibition, la flexibilité cognitive et la mise à jour, étaient dissociables. Cependant, l’analyse de corrélation entre ces trois mêmes variables a tout de même révélé un lien modéré entre elles, laissant penser à une certaine unicité ou similitude de fonctionnement au sein de ces processus. L’explication avancée était que toutes les épreuves réalisées sollicitaient le processus de mémoire de travail, et que l’inhibition intervenait elle aussi dans chacune d’entre elles, étant donné son potentiel modulateur. Les auteurs ont ajouté qu’une quatrième fonction exécutive pouvait aussi être dissociée des trois premières : la coordination de performance lors d’une double tâche (« dual-task coordination »). Les nouveaux modèles ont tendance de plus en plus à mettre en avant le caractère dissociable de ces fonctions, et ceci est appuyé par la diversité des aires corticales nécessaires à leur mise en œuvre.



Tests neuropsychologiques utilisés par Miyake et al. (2000) pour évaluer l’unicité et la diversité des fonctions exécutives dites « de cœur ». D’après Miyake et al., 2000.

7.2.5. Fonctions exécutives et aires corticales impliquées

Les études les plus récentes se sont focalisées sur les aires corticales impliquées dans chacun de ces processus cognitifs grâce aux techniques d’IRMf et PET. Si le lobe frontal apparaissait comme principal responsable du contrôle des fonctions exécutives, ces nouvelles techniques

nous ont permis de confirmer l'existence du réseau « cingulo-fronto-pariétal » cité précédemment (Newman et al., 2003). Nous nous intéresserons par la suite aux trois fonctions exécutives dites « de cœur » étudiées par Miyake et al., en nous focalisant plus en détail sur l'inhibition.

Le substrat neuronal de la mise à jour

Le processus de mise à jour consiste à modifier continuellement le contenu de la mémoire de travail (Baddeley, 1986) basée sur l'intégration des informations nouvelles. C'est une fonction très importante dans les processus d'apprentissage et dans la hiérarchisation des informations récemment acquises. Les aires corticales actives lors de tâches impliquant l'utilisation de ce processus spécifique se sont avérées être les aires frontales et préfrontales (cortex préfrontal dorsolatéral, cortex frontal inférieur et cortex cingulaire antérieur) ainsi que le cortex pariétal postérieur et le cortex pariétal inférieur (Braver et al., 1997; Cohen et al., 1997; Jonides et al., 1997; Schumacher et al., 1996; Smith et al., 1996). Van der Linden et al. (1999) spécifièrent que le cortex cingulaire antérieur jouait cependant un rôle prépondérant lors de l'évaluation et de la sélection des informations générées en interne.

Le substrat neuronal de la flexibilité cognitive

La flexibilité cognitive représente la capacité à réagir de façon appropriée aux différents stimuli environnementaux ainsi qu'à savoir passer aisément d'un type de traitement d'information à un autre de manière rapide et fluide. Des études utilisant la neuro-imagerie ont révélé l'implication d'aires cérébrales incluant le cortex préfrontal dorsolatéral, les cortex pariétaux inférieur et supérieur, ainsi que les régions pré-motrices (Fink et al., 1997; Gurd et al., 2002; Rogers et al., 2000; Wilkinson et al., 2001, Wager et al., 2004). Ces résultats suggèrent l'existence d'un réseau de structures corticales communes impliquées dans la flexibilité cognitive et dans la mémoire de travail (Wager et al., 2003).

Le substrat neuronal de l'inhibition

La notion d'inhibition est un terme assez général qui regroupe l'ensemble des mécanismes permettant la suppression délibérée et contrôlée des actions automatiques ou dominantes, en faveur d'un comportement orienté approprié. Friedman et Miyake (2004) distinguent 3 types d'inhibition : la résistance à l'interférence des distracteurs (capacité à inhiber l'interférence d'un stimulus externe non pertinent pour la tâche en cours), l'inhibition de la réponse prédominante (capacité à supprimer la réponse automatique lors d'une tâche habituelle) et la résistance à l'interférence proactive (capacité à résister à des intrusions en mémoire d'une information qui n'est plus pertinente). Ils expliquent que les deux premiers types apparaissent très liés dans leur fonctionnement contrairement au troisième. Les études récentes utilisant la neuro-imagerie ont montré que les aires corticales impliquées dans le mécanisme d'inhibition comprenaient le cortex cingulaire, préfrontal, pariétal et temporal (Bench et al., 1993; Bush et al., 1998; Chee et al., 2000; Collette et al., 2001; Garavan and Stein, 1999; George et al., 1994; Pardo et al., 1990; Taylor et al., 1997). Les auteurs s'accordent sur le fait que les aires corticales impliquées dépendent de la nature de la tâche cognitive étudiée. Comme expliqué précédemment, le type d'inhibition et le test neuropsychologique utilisé pour l'étudier peuvent varier énormément. Le test de Stroop (Stroop, 1935 ; MacLeod, 1991) évalue typiquement l'attention sélective et l'inhibition de la réponse prédominante à partir de stimuli visuels. Au regard de tous les avantages qu'il présente, nous avons décidé de l'introduire dans nos expérimentations. Nous détaillerons ses spécificités à la fin de ce chapitre.

7.2.6. Liens entre fonctions exécutives, fonctionnement attentionnel et mémoire de travail.

Les différents modèles utilisés concernant le contrôle des fonctions exécutives cognitives (Luria, 1973 ; Norman et Shallice, 1986 ; Stuss et Benson, 1986 ; Duncan et al., 2000) et le fonctionnement attentionnel se retrouvent sur plusieurs points. D'une part, étant donné la diversité des processus ou des aspects de chacun, les auteurs attribuent en général leur contrôle central sous une entité globale : par exemple, Norman et Shallice (1986) parlaient de système attentionnel superviseur, un terme similaire à celui proposé par Van Zomeren (1995). D'autre part, il est souvent question d'inhibition en lien avec l'attention et la capacité de focalisation. Il apparaît donc que le fonctionnement de l'attention sélective ainsi que de certaines fonctions exécutives utilisent les mêmes réseaux.

Il existe cependant une autre interface à distinguer et qui concerne la mémoire de travail. Cet aspect a longuement été étudié par Baddeley (1986), et nous reprendrons son modèle ici étant donné les similitudes avec les modèles abordés concernant le contrôle des fonctions exécutives ou du processus d'attention. La mémoire de travail est un aspect spécifique parmi ceux que regroupent généralement le processus de mémoire, et il s'agit ici selon lui d'un système à capacités limitées qui maintient et stocke des informations de façon temporaire et permet l'interface entre la perception, l'action et la mémoire à long terme. Ce modèle, qui rend compte des processus de maintien à court terme de l'information, est très repris aujourd'hui. Dans son fonctionnement, la mémoire de travail est très liée à la fonction exécutive décrite par Miyake et al. (2000) par le terme « mise à jour » (« updating »), et est parfois considérée comme une fonction exécutive à part entière en fonction des nomenclatures (Diamond, 2013). En effet, elle va rendre possible la mémorisation temporaire et la manipulation des informations dans différentes tâches cognitives complexes (ex : raisonnement, lecture, apprentissage du vocabulaire...). Elle est de ce fait très liée au processus d'attention endogène.

Le modèle de fonctionnement de Baddeley concernant la mémoire de travail est très similaire à celui de Norman et Shallice (1986) lorsqu'ils décrivent le système attentionnel superviseur : ici, un administrateur central coordonnerait la liaison entre une boucle phonologique, destinée au stockage à court terme de l'information verbale, et un calepin visuo-spatiale, destiné au stockage temporaire des informations visuelles et relatives à leur position dans l'espace et impliqué dans la création et la manipulation des images mentales. Ces deux systèmes seront

dits esclaves de l'administrateur central, étant donné son rôle modulateur, inhibiteur et d'organisation générale dans la hiérarchisation des informations. En cela, ce modèle attentionnel est très similaire à celui du Système Attentionnel Superviseur : l'administrateur central va sélectionner les informations pertinentes, inhiber les distractions extérieures, permettre une flexibilité mentale et coordonner les performances en situation de double tâche (« dual-task »). La mémoire de travail, le contrôle attentionnel et les fonctions exécutives fonctionnent selon les mêmes bases, utilisent un réseau cortical et sous-cortical d'activité similaire, et reposent sur l'existence d'un système de supervision attentionnel.

D'un point de vue comportemental, l'action conjointe de l'inhibition et de la mémoire de travail seraient indispensables à la focalisation et au maintien de l'attention. D'une part, la mémoire de travail va permettre de sélectionner l'objectif, la cible ou le point d'intérêt, de l'identifier, et ainsi supprimer tous les autres stimuli qui pourraient venir perturber ou distraire le sujet dans cette tâche. D'autre part, les capacités d'inhibition vont, elles, permettre cette suppression (Diamond, 2013 ; Rousseaux et al., 2006). Toutefois, la variété des tests cognitifs existants permet de pouvoir évaluer ces deux fonctions séparément, et nous nous focaliserons plus, dans le cadre de notre travail, sur les capacités d'inhibition par la suite.

Cette thèse ne vise pas à développer une théorie sur les fonctions exécutives, elle vise par contre à étudier la régulation de la motricité oculaire en interaction avec certains processus cognitifs. Plutôt que de rechercher où et quelles zones dans le cerveau s'activent, nous étudierons l'impact du contrôle visuomoteur binoculaire sur la cognition, et peut être vice-versa. Ainsi, nous ouvrons une autre voie dans la recherche des processus cognitifs et dans la recherche sur la motricité et la vision binoculaire.

7.3. Le test de Stroop

La problématique de cette thèse repose sur le lien entre vergence, accommodation, saccades et les processus exécutifs cognitifs. Pour évaluer ces derniers, nous avons choisi d'utiliser dans nos expériences d'une part un test de lecture, et d'autre part le test de Stroop. Avant de présenter notre partie expérimentale, nous allons aborder la description de ce dernier, qui est largement utilisé en neurosciences cognitives.

7.3.1. Présentation du test de Stroop

Le test de Stroop est un test neuropsychologique utilisé en clinique (Stroop 1935, McLeod, 1991) et sert dans le diagnostic de déficiences cognitives en lien avec la maladie d'Alzheimer, du trouble attentionnel lié à l'hyperactivité (TDHA), la dyslexie ou encore dans les déficits consécutifs à un traumatisme crânien (Goldberg et al., 2005, Kapoula et al., 2010, Lansbergen et al., 2007). Si de très nombreuses variantes existent à son sujet, il est en général composé de trois épreuves distinctes : une épreuve dite de lecture, pendant laquelle il est demandé de lire à voix haute une succession de mots désignant des couleurs et écrits en noir sur fond blanc ; une épreuve dite de dénomination de couleur, où les stimuli sont cette fois une succession de points de couleur pour lesquelles il est demandé de nommer la couleur de chacune d'entre-elles ; une épreuve d'interférence, où les noms des couleurs sont écrits dans une encre qui ne leur correspond pas et pour laquelle il est demandé de donner la couleur de l'encre en évitant de lire le mot écrit.



Exemple des tâches de lecture, dénomination et interférence lors du test de Stroop

Cette dernière épreuve d'interférence est réputée pour tester les capacités d'inhibition et d'attention sélective. En effet, elle demande de supprimer la réponse automatique attendue, qui est naturellement celle de la lecture, en faveur d'une réponse moins habituelle qui est celle de la dénomination de la couleur de l'encre dans lequel le mot est écrit. Ainsi, la tâche d'interférence fait directement appel au processus exécutif d'inhibition, plus particulièrement celui de la réponse prédominante.

Initialement conçu avec 3 planches de 100 stimuli chacune, plusieurs autres variantes ont aussi été proposées ensuite, tant d'un point de vue de la présentation du test que des méthodes d'analyse de ses résultats (voir McLeod, 1991 et Golden, 1975). En l'occurrence, ce qui est étudié en général est la comparaison entre les épreuves. Qu'elle soit entièrement accomplie et chronométrée (ex : temps passé pour 100 stimuli, voir McLeod, 1991) ou qu'elle soit réalisée en temps limité (ex : nombre de stimuli pour 45 secondes de passation, voir Golden, 1975),

les épreuves de dénomination et d'interférence sont dès lors comparées entre elles : dans la première, le sujet n'est focalisé que sur une seule tâche bien précise, celle de la reconnaissance et de la dénomination des couleurs, alors que dans la deuxième il doit inhiber la réponse de lecture en faveur de la réponse de dénomination. Ce travail d'inhibition a été rapporté par Stroop (1935) et McLeod (1991) qui ont mis en avant un coût temporel plus important : les épreuves chronométrées étaient plus longues à accomplir dans le cas de la tâche d'interférence comparées à la tâche de dénomination ou de lecture simple.

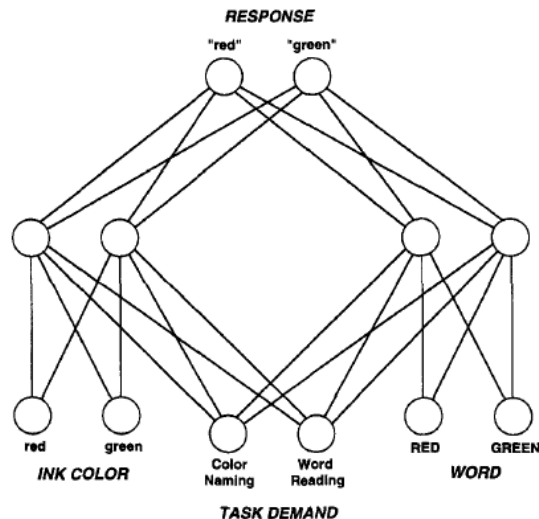
Chez un sujet adulte, il apparaît normal d'avoir des réponses plus rapides dans la tâche de lecture que dans la tâche de dénomination, étant donné le caractère automatique de la lecture en particulier pour des mots ne représentant que des couleurs. La tâche de dénomination fait, elle, appel à la reconnaissance des couleurs, processus moins automatisé dans la vie de tous les jours et différent de la reconnaissance d'un mot. La tâche d'interférence, enfin, est beaucoup plus complexe que les deux premières, puisqu'elle teste la capacité d'un sujet à supprimer la réponse automatique de lecture tout en enclenchant une réponse moins habituelle de dénomination. La différence de temps relevée pour accomplir ces deux épreuves représente l'effet d'interférence, c'est-à-dire le coût temporel qu'a entraîné le processus d'inhibition en supplément. Stroop (1935) et McLeod (1991) rapportent en effet un allongement significatif du temps nécessaire à accomplir la tâche d'interférence par rapport à celui mesuré pour accomplir la tâche de dénomination. Stuss et al. (2001) et Jensen et al. (1966) plaident pour une mesure plus précise de l'effet d'interférence en utilisant la soustraction directe des temps de passation des épreuves lorsque celles-ci ont été réalisées sur le même nombre de stimuli. Ainsi, on peut obtenir deux mesures différentes : l'effet de couleur, représentant la soustraction des temps de passation des tâches de dénomination et de lecture, et l'effet d'interférence, représentant la soustraction des temps de passation des tâches d'interférence et de dénomination.

Si l'effet de couleur peut être très variable en fonction des individus et ne témoigne que de la capacité à passer d'une reconnaissance de mot à une reconnaissance de couleur, l'effet d'interférence indique la capacité d'un sujet à résister à l'interférence, supprimer rapidement la réponse de lecture pour donner la couleur de l'encre, et témoigne donc de sa capacité à inhiber un processus habituel en faveur d'une réponse moins automatique. Cet intervalle de temps atteste directement du temps supplémentaire requis par le processus d'inhibition : plus il sera long, moins le sujet sera à même d'aisément utiliser ce processus. Il est ainsi possible

d'évaluer le processus d'attention sélective, qui est défini par la capacité d'un sujet à se concentrer sur une tâche ou une cible précise en présence de distracteurs, ou encore sur une caractéristique particulière d'un stimulus en ignorant les autres (Tipper et al., 1991 ; Everett et Lajeunesse, 2000 ; Treisman et Fearnley, 1969).

Si le temps est plus long pour dénommer les couleurs lorsque l'encre utilisée ne correspond pas à la signification du mot écrit, plusieurs théories existent pour expliquer ce point, comme celle de Hock et Egeth (1970), qui proposent d'abord que l'interférence engendrée résulte d'un conflit au stade de l'encodage perceptuel, c'est-à-dire au cours des étapes précoces du traitement de l'information visuelle. Plus tard, Morton et Chambers (1973) ont plaidé pour une hypothèse différente, qui présentait l'interférence de Stroop comme la conséquence d'une compétition au niveau de la réponse à donner. En effet, selon eux, les deux processus, de reconnaissance du mot et de reconnaissance des couleurs, empruntent des voies parallèles. Cependant, une seule réponse doit être apportée par le sujet au final, au travers d'un canal unique cette fois, et donc à capacité limitée. Le temps d'inhibition apparaît ici, car l'explication avancée veut que cela soit le stimulus traité par le processus le plus rapide, en l'occurrence celui de la lecture, qui soit logiquement exprimé en premier. Le fait de réclamer au sujet de préférer une réponse moins automatique, celle de la dénomination de la couleur, se ferait donc après l'inhibition de la réponse la plus rapide, et entraînerait un coût temporel plus important.

L'aspect « automatique » de la lecture a cependant été ensuite discuté. Pour Posner et Snyder (1975), ainsi que McLeod et Duncan (1998), la lecture serait un processus automatique quand la dénomination ferait plus référence à un processus contrôlé mobilisant des ressources attentionnelles. Logan (1980) avance pour sa part que chacune de ces dimensions présente en parallèle une possibilité de traitement automatique et contrôlé, et que l'interférence de Stroop résulterait du conflit lors de la réponse, liée à l'inhibition. Cohen et al. (1990) ont ensuite repris cette hypothèse et élaboré un modèle connexionniste composé de 3 unités (entrée, intermédiaire et sortie). Ils expliquent que ces unités sont reliées par des connexions plus ou moins fortes et que selon eux, celle relative à l'entrée sémantique et à la sortie « lecture du mot » est plus forte que celle relative à l'entrée de reconnaissance des couleurs et la sortie « nommer la couleur ».



Modèle connexionniste de Cohen et al. (1990).

Cette dernière théorie a été approfondie par Protopapas et al. (2007). Leur équipe a tout d'abord retrouvé un temps d'interférence plus long chez les enfants qui présentait une dyslexie ainsi que chez les enfants identifiés préalablement comme « mauvais lecteurs ». Les auteurs expliquaient ce résultat par le fait que chez les enfants, le processus de lecture n'était pas encore mature, en particulier du point de vue de l'identification des mots. Selon eux, pour que la réponse de lecture soit inhibée pendant la tâche d'interférence, il faut au préalable que le processus de lecture et d'identification du mot ait pu se produire. Ils alors ont avancé que le temps d'interférence relevé dépendait de deux facteurs majoritaires, la réponse de lecture restant celle privilégiée à la base : le temps d'intégration et d'identification du mot d'un côté, et le temps passé à l'inhibition de la réponse sémantique au profit de la réponse de nomination de la couleur d'un autre côté. En d'autres termes, la qualité du processus d'inhibition ne serait pas complètement reflétée par un temps d'interférence rapide au test de Stroop, la qualité du processus de lecture pouvant aussi impacter le temps de réponse. Dans une étude plus récente, Protopapas et al. (2014) ont montré que chez des enfants, pour qui le processus de lecture n'était pas encore complètement installé, le fait d'entraîner à lire des mots avait fait diminuer l'effet d'interférence, alors que le fait d'avoir entraîné un autre échantillon d'individus à nommer les couleurs n'avaient pas eu d'impact sur la mesure. Ces résultats plaident en faveur du modèle séquentiel présenté précédemment : pendant la tâche d'interférence, les individus identifieraient d'abord le mot, inhiberaient la réponse de lecture « automatique » et nommeraient la couleur de l'encre.

7.3.2. Aires corticales impliquées lors de la tâche de Stroop

De nombreuses études se sont focalisées sur les aires corticales impliquées dans les réponses d'inhibition pendant de la passation de l'épreuve d'interférence de Stroop. Evaluant les capacités d'attention sélective, ces différentes études ont permis d'une part de confirmer en partie les théories concernant les régions corticales impliquées dans le fonctionnement du système attentionnel, mais aussi de mieux comprendre le rôle de chacune des régions actives lors de ces tâches spécifiques. Utilisant les technologies d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ou de tomographie par émission de positrons (PET), ces études ont permis d'isoler les aires corticales sollicitées lors des différentes tâches du test de Stroop. En définitive, il nous est possible de les synthétiser en distinguant 3 grandes régions corticales particulièrement actives pendant les tâches du test de Stroop :

Le cortex cingulaire antérieur (ACC, Larrue et al., 1994; Carter et al., 1995; Peterson et al. 1999 ; Gruber et al., 2002 ; Adleman et al., 2002 ; Mansouri et al., 2009). Le cortex cingulaire antérieur est considéré comme une aire corticale clé dans le traitement cognitif des informations de différentes natures (sensorielles, cognitives, motrices et émotionnelles ; Bush et al., 2000). Situé à un véritable carrefour et présentant de fortes connections avec les régions antérieures comme postérieures, l'ACC peut de ce fait être subdivisé en deux régions (Vogt et al., 1992 ; Devrets et Raichle, 1998) : l'une ventrale, dite « affective » et impliquée dans les processus émotionnels, présentant des connections avec l'amygdale, à la substance grise périaqueducale, au noyau accumbens, à l'hypothalamus, l'insula antérieure, l'hippocampe et au cortex orbitofrontal ; et l'autre dorsale, dite « cognitive », et reliée anatomiquement avec le cortex préfrontal latéral, le cortex pariétal, l'aire motrice supplémentaire et l'aire prémotrice (Devinsky et al., 1995). De façon intéressante, on constate un fonctionnement particulier des deux subdivisions de l'ACC, et ce dépendamment de la nature de la tâche accomplie : lors d'une tâche cognitive comme celle de l'interférence de Stroop, l'activation de la partie dorsale se met en place alors que la désactivation de la partie ventrale se fait dans le même temps. Cette activation témoignerait de son rôle prépondérant dans la médiation du conflit entre réponse de lecture et dénomination des couleurs aux structures corticales responsables du contrôle exécutif qui initieront la réponse finale, en l'occurrence le cortex préfrontal.

Le cortex préfrontal (Pardo et al., 1990; Bench et al., 1993; Carter et al., 1995; Taylor et al., 1997; Adleman et al., 2002). Le modèle de Botvinick et al. (2001) désigne le cortex préfrontal comme système tout d'abord intégratif, recevant les informations depuis les autres structures

corticales, et exécutif, initiant les activations et inhibition concernant la réponse « Top-down » en fonction de la tâche demandée. Il apparaît comme la structure responsable de la décision à prendre dans la réponse à donner (Miller et Cohen, 2001 ; Brass et al., 2005, Mansouri et al., 2009). Lors de la tâche d'interférence de Stroop, son rôle sera de moduler les signaux de sorte à favoriser les réponses liées à la dénomination de la couleur de l'encre et à inhiber les réponses de lecture. Siège du contrôle cognitif et impliqué directement dans les processus de haut niveau (Buschman et Miller, 2007 ; Lebedev et al., 2004), il est à noter ici que lors de la tâche d'interférence, la région dorso-latérale du cortex préfrontal (DLPFC) est celle qui présente la plus forte activité lors des études réalisées grâce à la technologie IRMf (Leung et al., 2000 ; Adleman et al., 2002 ; Egnér et Hirsch, 2005).

Le cortex pariétal (Bench et al., 1993; Carter et al., 1995; Taylor et al., 1997 ; Peterson et al., 1999; Adleman et al., 2002). L'activation du cortex pariétal est retrouvée dans de nombreuses études se focalisant sur le test de Stroop, les différents auteurs plaidant pour son rôle dans le maintien de l'attention soutenue (Carter et al., 1995 ; Peterson et al., 1999 ; Adleman et al., 2002).

7.3.3. Mesure de l'interférence de Stroop : connexions avec la fonction exécutive d'inhibition, les mécanismes attentionnels, le processus automatique de lecture et les résultats scolaires

Par sa variété d'activités proposées et les liens des mécanismes cognitifs qu'il évalue avec la lecture, la gestion des ressources attentionnelles ou les capacités de contrôle inhibiteur en termes de fonction exécutive, le test de Stroop nous apporte plusieurs mesures reflétant les capacités d'un sujet dans différents domaines. Il nous permet en effet, tel qu'il est construit, d'apprécier la rapidité en lecture simple ainsi que pour d'autres tâches visuelles moins habituelles (dénomination des couleurs) ou de plus haute difficulté cognitive (interférence), mobilisant des aires corticales plus variées et faisant appel à la fonction exécutive d'inhibition.

Ainsi, il nous est possible d'analyser le comportement visuel en fonction de la tâche cognitive exigée, et mieux nous rendre compte si celui-ci a tendance à évoluer en fonction de cette dernière, ce qui n'a pas encore été étudié avec les outils actuels à notre disposition. L'intérêt d'utiliser ce test résidait surtout dans notre volonté première de croiser des mesures de capacités cognitives de haut niveau avec des mesures concernant la qualité du système visuel,

tant du point de vue des mouvements de vergence, de saccade ou des capacités accommodatives.

En effet, si les études précédemment citées font état de liens entre difficultés d'apprentissage et/ou difficultés de lecture et qualité du système visuel, ces résultats restent à approfondir, des facteurs plus précis restent à déterminer, et nous avons donc décidé d'observer l'aspect moteur avant toutes choses. En cela, le test de Stroop nous est fort utile, car il est au croisement entre mécanisme cognitif de la lecture, capacités d'inhibition et capacités de maintien de l'attention.

Processus automatique de lecture et interférence de Stroop

Concernant le mécanisme automatique de lecture, la tâche de Stroop reproduit le plus souvent les saccades de progression réalisées d'un mot à un autre habituellement, si ce n'est cette fois qu'elles seront majoritairement de même amplitude. Si d'un point de vue moteur, la lecture présente un processus automatisé, les processus cognitifs qui lui sont associés, comme la compréhension et la mémorisation, présentent eux aussi des mécanismes particuliers faisant appel cette fois à des fonctions cognitives exécutives particulières (Kieffer et al., 2013). Déjà abordé par Rayner (1998) et par Henderson et al. (2015), la période de fixation permet au sujet la reconnaissance du/des mot(s) qu'il fixe. Cette période sera plus ou moins longue, dépendant de différents facteurs comme la fréquence habituelle du mot, sa longueur, ou encore la prédictibilité de son usage dans le contexte (Rayner 1998, Clifton et al., 2016). Cette reconnaissance est issue d'un processus automatique qui se développe avec l'expérience de la lecture, mais qui cependant est complexe. Il est en général réalisé de façon très rapide, avec un minimum d'effort et sans l'association avec une éventuelle attention consciente (Samuels, 1999). Selon ce dernier, l'hypothèse d'un processus de lecture automatique mot par mot est largement acceptée aujourd'hui, même si une autre hypothèse plus globale de texte existe elle aussi (Logan, 1997). L'équipe de recherche de Protopapas a beaucoup œuvré dans l'analyse des résultats au test de Stroop et dans ses liens possibles avec le caractère automatique du mécanisme de la lecture. Une première étude publiée en 2007 a montré chez des enfants une corrélation entre qualité du contrôle inhibiteur et capacités de lecture : plus le niveau de lecture était faible, plus l'effet d'interférence était important. Cette corrélation était appuyée par le fait que les enfants dyslexiques présentaient des temps d'interférence plus longs et de plus nombreuses erreurs que les enfants non dyslexiques. Selon les auteurs, ces résultats s'expliquent par le fait que les mécanismes de lecture automatique et l'interférence de Stroop

font appel à des processus cognitifs similaires, d'où le rapprochement avec les fonctions exécutives de type inhibition. Ces résultats corrélant un mauvais niveau de lecture de façon plus globale avec un effet d'interférence Stroop plus important sont aussi retrouvés dans différentes autres études (Everatt et al., 1997 ; van der Shoot et al., 2000). Une étude supplémentaire de Borella et al. (2010) a montré que la mauvaise compréhension en lecture et le manque de résistance à l'interférence sont liés chez les enfants, ceci venant corroborer les arguments de l'équipe de Protopapas à ce sujet. Cain (2006) a d'ailleurs aussi montré la corrélation entre déficit dans la fonction inhibitrice, difficulté de mémorisation et de compréhension en lecture chez des enfants. Enfin, utilisant le test de Stroop chez des adolescents, Kapoula et al. (2010) ont mis en exergue un déficit dans les processus d'attention et d'inhibition plus marqué chez les individus dyslexiques (temps d'interférence plus long, plus d'erreurs commises), qui présentaient aussi des problèmes de lecture. Booth et Boyle (2009) ainsi que Kieffer et al. (2013) confirmeront ce lien entre contrôle inhibiteur et compréhension en lecture, en y incluant pour ces derniers une deuxième fonction exécutive d'importance comme la flexibilité, et montreront que processus cognitifs de ce type et aptitudes à la compréhension partagent de ce fait des fonctionnements similaires. Le résultat d'interférence au test de Stroop nous donne donc, entre autres, une mesure temporelle de la capacité d'un sujet à inhiber une réponse automatique au profit d'une réponse moins habituelle. Le nombre d'erreurs effectuées indique aussi la capacité du sujet à maintenir son attention sur la tâche demandée tout au long du test.

Les récentes études suggèrent donc désormais que cette mesure puisse aussi refléter la qualité du processus automatique de lecture étant donné leur similitude de fonctionnement. Plus récemment, une autre étude de Protopapas et al. (2014) a montré qu'entraîner des enfants à la lecture de mots désignant les couleurs avaient fait diminuer leur temps d'interférence, alors qu'en entraîner d'autres à la dénomination des couleurs ne l'avait pas fait significativement évoluer. Les auteurs plaident donc pour l'existence d'un lien entre temps d'interférence de Stroop et habileté en lecture, retrouvé dans leur précédente étude de 2007 : le temps d'interférence refléterait plus la latence de l'inhibition de la lecture plutôt que la capacité à employer la dénomination des couleurs, et serait en lien étroit avec le processus automatique de lecture. Ainsi, le temps d'interférence en comparaison au temps de dénomination classique dépendrait de 2 facteurs majeurs : la rapidité qu'un sujet présente à encoder la lecture et l'efficacité du mécanisme inhibiteur à supprimer cette réponse. En d'autres termes, le mécanisme de lecture automatique se doit d'être rapide afin de reconnaître au plus vite le mot,

et le mécanisme d'inhibition se doit lui aussi d'être véloce afin de supprimer cette réponse automatique le plus rapidement possible, pour que l'interférence de Stroop soit des plus courtes (Protopapas et al., 2014). Selon les auteurs, il serait donc possible d'améliorer cette performance en entraînant à la lecture. Toutefois, une fois ce processus installé, comme chez les populations adultes, les résultats ne seraient pas significativement modulables.

Liens entre interférence de Stroop et déploiement attentionnel

D'un point de vue attentionnel maintenant, l'interférence de Stroop est aussi une mesure reflétant les capacités d'inhibition (Diamond, 2013). L'inhibition est considérée comme une des fonctions exécutives « de cœur » les plus importantes par Miyake et al. (2000), tant elle est susceptible d'intervenir dans de nombreux autres processus cognitifs de haut niveau, et en particulier dans des tâches impliquant le maintien de l'attention et la résistance aux interférences. En effet, si nous reprenons les différents modèles concernant les fonctions exécutives cités précédemment, nous observons rapidement qu'afin d'atteindre un objectif et après avoir planifié l'agencement des étapes pour arriver à ses fins, la résistance aux distracteurs et le maintien de l'attention vers le but fixé seront indispensables. Le processus d'inhibition serait donc une des fonctions principales du Système Attentionnel Superviseur décrit par Norman et Shallice (1986) et permettant une modulation sur les « schémas d'action » disponible au sujet pour prendre une décision appropriée. Diamond (2013) insiste aussi sur les liens entre contrôle inhibiteur et mémoire de travail, développant le fait que l'un supporte l'autre dans le processus de maintien de l'attention. Selon elle, les capacités d'inhibition reflètent aussi le self-control et l'autodiscipline mentale qu'un individu est capable de mettre en place dans différents domaines, comme s'empêcher d'agir de façon impulsive, mais aussi et surtout au niveau scolaire, comme être capable de rester concentré sur la tâche à accomplir, malgré les échecs précédents, l'ennui ou les distractions. En lien avec cela, de nombreuses études sont venues montrer qu'un déficit dans le contrôle inhibiteur pouvait avoir une incidence néfaste sur la réussite scolaire. Se basant sur les réponses des sujets eux-mêmes et celles de leur famille proche et enseignants, les études comportementales de Moffitt et al. (2011) ont suivi des enfants nés la même année sur une durée de plus de 30 ans. Elles ont exposé que les jeunes qui présentaient les meilleures capacités de contrôle comportemental à l'école (attendant facilement leur tour pour répondre, plus attentif, moins facilement distrait, plus endurant et moins impulsif...) entre 3 et 11 ans avaient beaucoup moins de chance par la suite de décrocher au niveau scolaire ou de devenir absentéiste. Dans la même lignée, Duckworth et Seligman (2005) ont montré que l'autodiscipline avait beaucoup plus d'impact

sur la réussite académique que ne l'avait le quotient intellectuel (QI) chez les adolescents comme chez les jeunes adultes. Les élèves les plus capables de se discipliner dans des tâches scolaires quotidiennes étaient ceux qui réussissaient le mieux, ce qui suggérerait que les capacités de contrôle inhibiteur, et donc certaines fonctions exécutives cognitives, auraient un rôle majeur dans la réussite scolaire, bien plus important que celui du quotient intellectuel. Ces résultats ont été confirmés par plusieurs études faisant des corrélations directes entre capacité d'inhibition, mémoire de travail et réussite scolaire (Redick et Engle, 2006 ; Martinussen et Major, 2011 ; Haapala et al., 2014). Ces fonctions exécutives particulières, qui vraisemblablement sollicitent des réseaux corticaux similaires à ceux contrôlant les mouvements de saccades et de vergence, présentent une importance cruciale dans la gestion des ressources attentionnelles. Un test comme celui de Stroop, par exemple utilisé comme outil diagnostique dans l'étude de Fernandes et al. (2016) et apportant des résultats similaires aux études précédentes chez des enfants et adolescents, présente dès lors un intérêt si nous souhaitons étudier les interactions entre qualité de la vergence, de l'accommodation, de la motricité binoculaire et capacités attentionnelles.

Liens entre interférence de Stroop et troubles de déficit attentionnel

Si l'on se focalise maintenant sur les populations diagnostiquées avec un trouble de déficit attentionnel (ADD) ou d'hyperactivité associé à un déficit attentionnel (ADHD), les désordres les plus relayés résident dans les problèmes d'inattention, de distractibilité et d'impulsivité, faisant référence directe aux capacités cognitives d'inhibition. De nombreuses études ont montré que ces populations présentaient un déficit au niveau des fonctions exécutives (Pennington et Ozonoff, 1996 ; Seidman et al., 1997 et 2000 ; Barkley, 1997). L'étude de Granet et al. (2005) a cependant mis en lumière un résultat intéressant de notre point de vue, puisqu'il a recensé dans ces populations un nombre trois fois plus important de dysfonctionnements type « insuffisance de convergence » en comparaison des ratios retrouvés dans une population contrôle. Si le lien n'est ici que purement statistique et non discuté, il témoigne d'une qualité de la vergence plus facilement détériorée chez les sujets présentant un déficit attentionnel diagnostiqué. Si l'on s'attarde maintenant sur les plaintes relayées par les personnes souffrant de trouble de la vergence ou de l'accommodation, on retrouve ici encore une assez forte prévalence de problèmes de concentration et d'attention, par exemple en étudiant la symptomatologie relayée par les échelles CISS (Rouse et al., 2009) ou COVD QOL (Vaughn et al., 2006). Si de premières études ont tenté de discerner l'origine du problème, visuelle ou liée à un éventuel déficit attentionnel, celle de Borsting et al. (2005)

a montré pour la première fois, en sélectionnant précisément l'échantillon qu'ils étudiaient, que les enfants diagnostiqués pour des troubles symptomatiques de type insuffisance accommodative ou de convergence expérimentaient aussi plus de symptômes caractéristiques reportés habituellement sur une échelle de Connors (1997) et liés à un déficit attentionnel. Cet échantillon n'était pas diagnostiqué pour ce type de trouble (ADD ou ADHD) ni pour d'éventuels problèmes de dyslexie. Une première conclusion permet de confirmer les pistes d'une première étude (Borsting et al., 1999), attestant que les enfants diagnostiqués pour des insuffisances de vergence ou d'accommodation montraient des comportements similaires à ceux retrouvés chez les enfants diagnostiqués pour des troubles de l'attention (ADD ou ADHD) concernant l'inattention.

Le lien entre interférence de Stroop et symptômes relatifs aux problèmes d'attention a été plus récemment étudié par Ikeda et al. (2013) chez les enfants et jeunes adultes. Les auteurs retrouvent entre autres des corrélations directes entre le nombre de symptômes et l'interférence de Stroop : plus les symptômes d'inattention et d'impulsivité étaient présents chez des enfants non diagnostiqués pour des troubles de la sorte (ADD ou ADHD), plus l'interférence de Stroop était importante. Il en était de même au niveau des scores d'erreurs commises et des temps d'accomplissement globaux pendant l'épreuve d'interférence uniquement. Ces corrélations n'étaient cependant pas retrouvées pour l'épreuve du Stroop inversé, ni pour les autres épreuves. Ces résultats plaident donc eux aussi pour une relation directe entre mécanisme d'inhibition de la tâche de Stroop et problèmes attentionnels. Wilmer et Buchanan (2009), étudiant cette fois une population de jeunes adultes, ont recensé les symptômes relatifs à des troubles attentionnels grâce à une échelle de Nadeau (1994). Ils ont pour leur part montré un lien entre le nombre de symptômes rencontrés et la valeur de la phorie horizontale mesurée après un travail prolongé en vision de près, sollicitant donc accommodation et convergence : plus celle-ci était d'amplitude importante quelle que soit sa direction, plus le sujet rapportait de symptômes. Ces résultats suggèrent qu'un déficit plus global dans les vergences d'adaptation et dans la réponse lente de vergence serait donc associé à une recrudescence des plaintes relatives au maintien de l'attention. Ils ouvrent le champ des possibles sur les liens entre vergence et symptomatologie relatives aux problèmes de maintien de l'attention : ces problèmes ne seraient plus exclusifs à l'insuffisance de convergence ou même l'insuffisance accommodative comme l'avançaient plusieurs études (Rouse et al., 2009 ; Granet et al., 2005 ; Borsting et al., 2005). Le mécanisme de vergence d'adaptation présente fréquemment un déficit chez les sujets diagnostiqués avec un trouble de

vergence (Cooper et Jamal, 2012). Des pistes nous sont aussi apportées concernant l'évolution des comportements scolaires après une rééducation de la vergence par Borsting et al. (2012), qui montrent des capacités de concentration et d'endurance au travail améliorées après une réhabilitation de la vergence chez des enfants.

Liens entre interférence de Stroop et dyslexie

Les individus dyslexiques présentent par définition un déficit en lecture. Toutefois, ces difficultés peuvent se caractériser sous différentes formes. En effet, un déficit en lecture peut trouver son origine au niveau d'une perception sensorielle diminuée, d'un déficit des capacités sémantiques ou linguistiques, mais aussi d'un problème de motricité oculaire (Rayner et al., 2011). Pour ce dernier, la littérature montre que certaines théories réfutent le lien de causalité entre dyslexie et mauvais contrôle du système oculomoteur (Lyon et al., 2003). Des études réalisées sur des enfants montrent toutefois que concernant leur motricité en lecture, on retrouve un plus grand nombre de saccades de régression, des fixations moins stables (Pavlidis, 1981) et plus longues (Rayner, 1985 ; De Luca et al., 1999 ; Trauzettel-Klosinski et al., 2010), des saccades de plus petites amplitudes, si on compare ces populations à des enfants non dyslexiques. Plus récemment, Kirkby et al. (2011) ont montré que la coordination des saccades était plus mauvaise chez les enfants dyslexiques, et la fixation était elle aussi moins stable. Des résultats similaires ont été retrouvés dans l'étude de Jainta et al. (2011) concernant la coordination des saccades de lecture. Une étude récente de Séassau et al. (2014) est venue renforcer ces résultats : la disconjugaison pendant et après les saccades en lecture était toujours plus importante chez les enfants dyslexiques, les durées de fixation étaient aussi plus longues mais avaient tendance à diminuer avec l'âge, d'où un effet de développement retrouvé ici. Ces caractéristiques motrices ont été détaillées dans l'ouvrage de Stein et Kapoula (2012) et mettent en avant un déficit oculomoteur d'importance. Si le plus grand nombre de saccades en lecture peut s'expliquer par un empan perceptuel de plus petite amplitude chez les sujets dyslexiques (Bosse et al., 2007 ; Valdois et al., 2012 ; Peyrin et al., 2010), et que la théorie d'un déficit de la voie magnocellulaire (Stein et Walsch, 1997) fait encore débat, les faits indiquent que la coordination binoculaire est tout de même altérée chez une population qui présente des problèmes de lecture. Le test de Stroop vient dès lors corroborer les hypothèses émises plus en amont concernant le lien entre les mécanismes de lecture et d'inhibition. Comme cité précédemment, le test de Stroop présente des résultats détériorés chez les enfants dyslexiques (Protopapas et al., 2006 ; Everatt et al., 2007) et chez les adolescents (Kapoula et al., 2010). La fonction cognitive d'inhibition de façon plus générale apparaît atteinte (Fischer et Hartnegg, 2000), ce qui n'est pas forcément le cas pour d'autres comme flexibilité par exemple (Stoet et Snyder, 2007 ; Kapoula et al., 2010). Ainsi, même si nous avons décidé de ne pas inclure de sujets dyslexiques dans nos études, le lien entre interférence de Stroop, qualité de lecture et qualité oculomotrice doit encore être approfondi suite aux constats observés au sein de cette population. Grâce à ce test, la

connexion entre qualité de la vergence et/ou de l'accommodation, relation avec la coordination binoculaire, fonction exécutives et ressources attentionnelles pourra dès lors s'étudier avec beaucoup plus de profondeur.

Liens entre fonctions exécutive cognitives et résultats scolaires

La réussite scolaire est aussi en lien directe avec les fonctions exécutives cognitives, et compte vraisemblablement pour beaucoup plus que le quotient intellectuel selon Diamond (2013). Best et al. (2011) ont étudié l'évolution des habiletés concernant les fonctions exécutives complexes et les ont corrélées aux performances scolaires chez des enfants et adolescents. Les résultats ont montré que, si les performances aux tests cognitifs s'amélioraient jusqu'à l'âge de 15 ans, leur développement était très fortement corrélé aux évolutions des résultats d'aptitudes en mathématiques et en lecture. De ce fait, ces conclusions restent dans la lignée de ce qui avait été déjà réalisé au sujet des fonctions exécutives : elles contribuent directement à la réussite scolaire, cependant l'inverse n'est pas observé (Bull et al., 2008; George et Greenfield, 2005; Hitch et al., 2001; Miller et Hinshaw, 2010), et ce sont plus particulièrement l'inhibition et la mémoire de travail qui semblent être en relation avec les performances en lecture et en mathématiques (Blair et Razza, 2007; Bull et Scerif, 2001; Protopapas et al., 2007; St. Clair-Thompson et Gathercole, 2006; van der Schoot et al., 2000; van der Sluis et al., 2007).

Le test de Stroop implique l'activité des fonctions visuomotrices dans sa passation. Il va nous permettre d'aborder nos expérimentations avec une approche innovante, car ses trois différentes tâches ne réclament pas la même charge cognitive pour être accomplies. Ainsi, nous pourrions étudier si cette charge cognitive supplémentaire pendant la phase d'interférence induit un comportement oculomoteur différent de celui observable pendant la tâche de lecture ou de dénomination. Ce test nous sera donc d'une grande utilité dans l'approfondissement des interactions entre vision sensorielle, motrice et cognition.

Synthèse

Dans les précédents chapitres, nous avons exposé les généralités sur la vision sensorielle, la vision binoculaire, les réponses de vergence et d'accommodation, en terminant par un descriptif de l'approche clinique optométrique et en soulignant ses limites. L'approfondissement du lien saccade-vergence-accommodation nous a permis d'aborder les relations entre dysfonctionnements A-V, motricité binoculaire, problèmes de lecture et problèmes d'attention avec plus de précisions. Ces relations constituent le socle de la thèse, qui vise à éclairer les mécanismes d'interaction sur l'impact des désordres A-V.

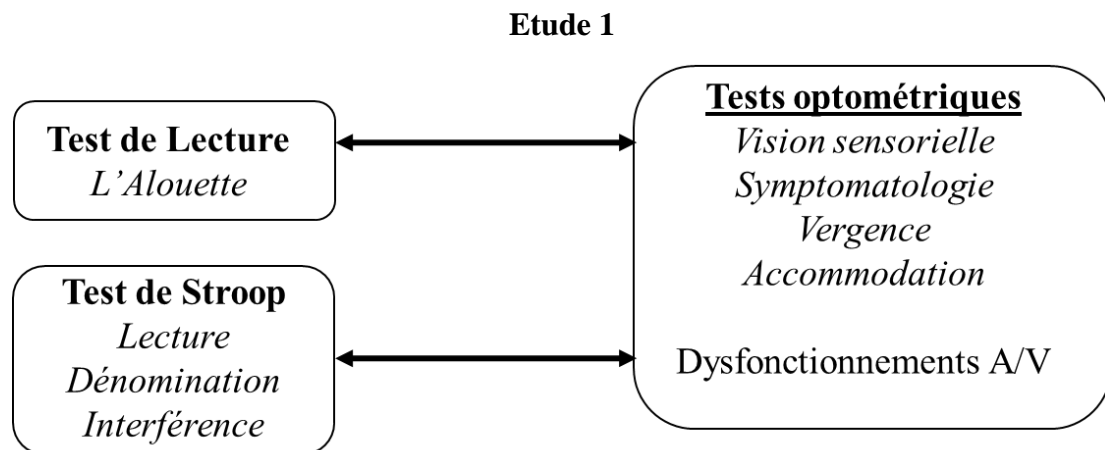
Son objectif est d'apporter des preuves expérimentales sur l'impact des désordres A-V sur la lecture et les fonctions exécutives cognitives. Nous posons comme première hypothèse qu'une mauvaise synergie aura un impact néfaste sur la motricité binoculaire, en particulier sur la coordination binoculaire entre saccades, vergence et accommodation, sur le traitement visuel et sur le traitement cognitif. En complément de celle-ci, nous avançons la deuxième hypothèse d'une interaction au niveau cortical entre processus visuomoteurs et cognitifs.

L'approche que nous avons choisie est d'associer les mesures et diagnostics cliniques orthoptiques et optométriques aux mesures objectives des mouvements oculaires réalisées par vidéo-oculographie. Au plan cognitif, la thèse utilise deux tests : un test de lecture (L'Alouette) et d'autre part le test de Stroop.

**PARTIE 2 : ETUDES
EXPERIMENTALES DE LA THESE**

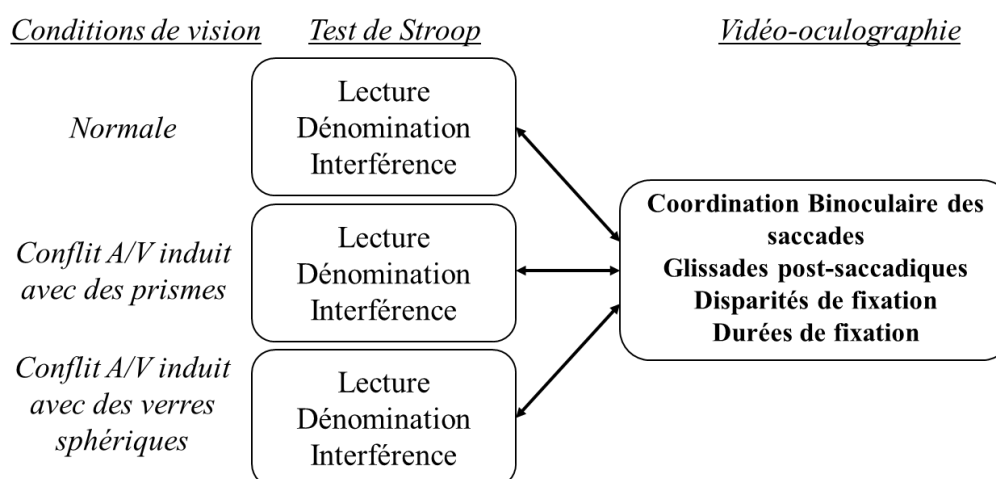
Préface

Dans cette partie, nous présentons 3 études. Les deux premières utilisent le test de Stroop. Dans l'étude 1, nous avons réalisé une investigation optométrique exhaustive dont les résultats ont été croisés à ceux d'un test étalonné de lecture (l'Alouette) ainsi qu'à ceux du test de Stroop. Des corrélations ont d'abord été réalisées pour identifier les tests cliniques les plus en lien avec les performances en lecture et dans la tâche d'inhibition de Stroop. Nous avons ensuite comparé les performances de différents sous-groupes de notre échantillon, en isolant le groupe sans dysfonctionnement des groupes majoritaires en présentant.



Dans l'étude 2, nous avons d'abord mesuré et analysé la coordination binoculaire des saccades et des fixations pendant les différentes tâches du test de Stroop chez des sujets sains en utilisant un vidéo-oculographe. Dans d'autres conditions de cette même étude, nous avons induit expérimentalement un conflit entre la vergence et l'accommodation à l'aide soit de prismes convergents soit de verres sphériques ; les sujets devaient alors effectuer les trois tâches du test de Stroop, cette fois dans des conditions optiques modifiées. Nous avons mesuré l'impact du conflit vergence/accommodation à la fois sur la coordination binoculaire des saccades, les disparités de fixation et sur les différentes performances cognitives.

Etude 2

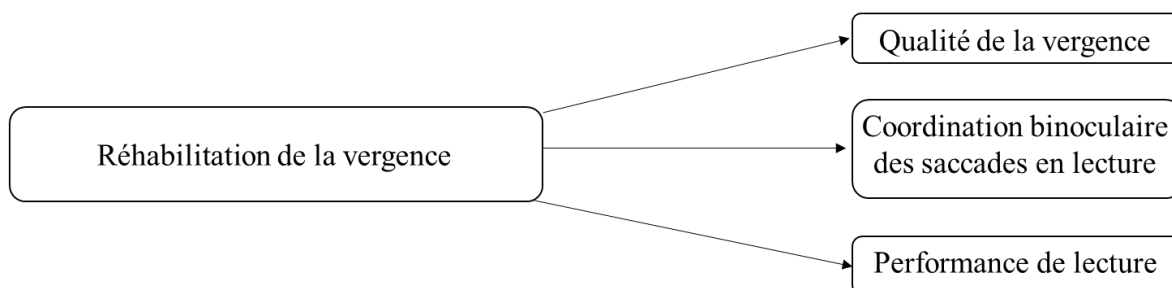


Cette approche expérimentale pluridisciplinaire, croisant optique, oculomotricité et neuropsychologie s'est révélée très prometteuse. Nous présenterons la méthodologie commune pour ces 2 études, puis l'étude 1 suivie de l'étude 2.

L'étude 3 concerne l'échantillon d'étudiants ayant suivi une neuro-réhabilitation pour leur trouble de vergence. Des études préalables (Kapoula et al., 2016 ; Morize et al., 2017) ont montré les bénéfices d'une rééducation de la vergence réalisée avec l'appareil REMOBI (US 8851669), table trapézoïde équipée de diodes et de buzzers juxtaposés. Le protocole de réhabilitation utilisé et appelé « Vergence double-step » (Vd-s) est issu de la recherche ; en particulier le paradigme d'adaptation saccadique introduit par McLaughlin (1967). Après 5 séances hebdomadaires d'application du protocole vergence double-step, les performances de vergence se sont normalisées chez ces sujets en diminuant la variabilité de tous leurs paramètres (amplitude, durée et vitesse), et en diminuant la latence, aussi bien de convergence et de divergence. De surcroît, la symptomatologie a disparu et ceci de façon durable (absence de symptomatologie un an après). Ces études de réhabilitation auxquelles nous avons participé en tant qu'investigateur secondaire ne seront pas détaillées dans le mémoire de cette thèse, mais elles sont citées dans le CV. En revanche, l'étude 3 présentée en dernière partie présentera les bénéfices sur l'activité de la lecture issus de la neuro-réhabilitation de la vergence. Nous avons investigué comment la coordination binoculaire des saccades, le glissement post-saccadique et les durées de fixations avaient évolué, comparant ces paramètres avant et après la réhabilitation des vergences. Ainsi, nous avons pu d'une part tester l'hypothèse de Yang et Kapoula (2003) concernant l'implication du contrôle de la

vergence dans la coordination binoculaire des saccades, basée sur la neuroplasticité ; d'autre part apprécier les bénéfices apportés par la réhabilitation de la vergence sur les paramètres tels que les durées des fixations et le temps total de lecture du texte, qui sont liés aux processus cognitifs. Les articles publiés ou soumis correspondants seront présentés en annexe. Les références dans leur ensemble sont présentées à la fin du document.

Etude 3



CHAPITRE 8 : Méthodologie générale

8.1. Population

Tous les participants à nos études étaient étudiants, en grande majorité en optique et provenant du *Lycée d'optique Fresnel*. Ils étaient tous en bonne santé, ne présentaient pas de troubles neurologiques, neuro-otologique ou ophtalmologique. Dans toutes les études présentées ci-après, ils ont participé de façon volontaire suivant un protocole approuvé par le conseil d'éthique de l'Hôpital Necker (CPP n°07035).

8.2. Tests optométriques

Tous les sujets ont participé à plusieurs examens optométriques permettant des mesures concernant leur vision. Afin de pouvoir dépister les problèmes de vision mais aussi les dysfonctionnements cités plus tôt, nous avons procédé à un examen exhaustif de tests cliniques pour sélectionner notre échantillon. Pour cette partie clinique, nous nous sommes basés sur l'ouvrage de Scheiman et Wick (2014), et sur les nomenclatures présentées précédemment pour dépister et qualifier la nature des dysfonctionnements A-V.

8.2.1 Symptomatologie

Chaque participant a rempli l'échelle CISS (Convergence Insufficiency Symptom Survey, Rouse et al., 2009). Le sujet évalue la fréquence des symptômes visuels qu'il est susceptible de rencontrer sur une échelle de 5 points et qui lui sont proposés au travers de 15 questions. La fréquence des troubles à chaque point pondère le score pour chacune des questions, il est donc possible d'obtenir un score entre 0 et 60. Plus celui-ci est élevé, plus il témoigne des plaintes relatives à la vision rencontrées par le sujet et rapportées par celui-ci. Cette échelle a tout d'abord été conçue pour dépister les signes d'insuffisance de convergence, dysfonctionnement qui peut être suspecté à partir d'un score de 16 pour les enfants et 20 pour les adultes (Rouse et al., 2009). Nous avons souhaité maintenir un standard de 16 chez le jeune adulte pour la première étude, afin de différencier les sujets asymptomatiques des sujets symptomatiques. En effet, cette échelle nous renseigne aussi de façon plus générale sur les troubles rencontrés, plus particulièrement relatifs à la vision proche, et pour certains communs à plusieurs autres dysfonctionnements de vergence et/ou accommodatifs. Cet outil représentait donc une base sur laquelle nous pouvions nous appuyer par la suite pour évaluer cliniquement la symptomatologie des sujets, potentiellement apprécier son évolution dans le temps, et confirmer des diagnostics de dysfonctionnements symptomatiques.

8.2.2. Réfraction et correction

- Réfraction objective à l'aide de l'autoréfracteur ARK-1 (Nidek)
- Réfraction subjective à l'aide du phoropter RT-600 (Nidek)



Autoréfracteur ARK-1 Nidek, réfracteur manuel RT-600 Nidek, Oculus Adult UB4 Zeiss

Appliquant les mêmes méthodes décrites par Benjamin (2006) et Scheiman et Wick (2014), le reste des mesures utilisées par la suite ont été effectuées à la fois à l'aide du phoropter manuel RT-600 (Nidek) pour certains tests plus statiques et d'une monture d'essai Oculus Adult UB4 (Zeiss) pour des tests dynamiques, à chaque fois équipés de la correction de meilleure acuité trouvée subjectivement précédemment.

8.2.3. Acuité visuelle

- Acuité VL mesurée monoculairement et binoculairement à l'aide d'une charte de Snellen étalonnée pour 5m en vision de loin (Essilor).
- Acuité VP mesurée monoculairement et binoculairement à l'aide d'une charte de Snellen étalonnée pour 33cm en vision de près (Optoprox, Essilor).

Ces tests nous ont permis de mesurer le pouvoir de résolution des sujets. Ainsi, leur capacité à discriminer de fins détails en haut contraste a pu être évaluée, ce qui nous a permis, entre autres, de dépister les éventuelles amblyopies ou amétropies non ou mal corrigées.

8.2.4. Vision binoculaire

- Test d'acuité stéréoscopique à l'aide des cercles de Wirt (Stereo Optical Company), dissociation partielle par polarisation.



Stereo Fly Test et test des cercles de Wirt

Ce test nous a permis d'avoir une mesure précise de l'acuité stéréoscopique de vision de près chez nos sujets, et ainsi de vérifier si la vision binoculaire s'était bien construite correctement chez eux. Sa précision allait jusqu'à 40''.

- Test de disparité de fixation et de suppression centrale à l'aide de l'unité de Mallett en vision de loin et vision de près, dissociation partielle par polarisation (Mallett Dual Fixation Disparity Test Unit and Mallett Near Vision Unit NV5).



Unités de Mallett Vision proche et lointaine (Mallett Dual Fixation Disparity Test Unit and Mallett Near Vision Unit NV5), à utiliser avec des filtres polarisés croisés adaptés.

Ce test nous a permis de détecter la présence d'éventuelle disparité de fixation horizontale ou verticale. Il nous était ensuite possible de mesurer le prisme minimum nécessaire à l'annuler, avec une barre à prisme.

8.2.5. Phories et rapport AC/A

- Une phorie représente une déviation des lignes de regard habituellement maintenue latente par un désir de fusion. Elle est donc observable lorsque le sujet présente une vision binoculaire dissociée, à l'aide par exemple d'un cache (masquage), d'une baguette de Maddox ou d'un prisme (méthode de Von Graefe). Les phories horizontales et verticales ont une première fois été évaluées avec la méthode du masquage lorsque le sujet portait sa correction habituelle, puis avec la méthode de

Von Graefe à l'aide du Phoropter une fois la correction optimale subjective trouvée. Le sujet fixait une lettre d'acuité égale à 80% de son acuité maximale, la vision binoculaire était dissociée dans un plan grâce à un prisme (6Δ pour le plan vertical ; $10+\Delta$ base interne pour le plan horizontal), et les extériorisations du sujet étaient ensuite réalignées dans l'autre plan grâce aux prismes rotatifs. Les valeurs moyennes attendues par Morgan (1944) avec ces méthodes sont 1Δ d'exophorie ± 2 en vision de loin (Phorie VL) et 3Δ d'exophorie ± 3 en vision de près (Phorie VP) dans le plan horizontal et orthophorie (absence de déviation latente) dans le plan vertical et selon l'axe antéro-postérieur (absence de cyclophorie). Nous avons gardé les nomenclatures habituelles pour caractériser une phorie : l'exophorie est exprimée en signe négatif et l'ésophorie en signe positif.

- Le rapport AC/A, relatif à l'évaluation de la force du lien Accommodation/Convergence accommodative, était ensuite calculé une première fois à l'aide de la formule :

$$(15 - \text{Phorie VL} + \text{Phorie VP})/2.5$$

Les valeurs moyennes attendues sont de $4\Delta/\delta \pm 2$

- La phorie horizontale en vision de près a été mesurée deux fois supplémentaires après l'ajout de $+1.00\delta$ et -1.00δ sur les deux yeux, afin d'évaluer la force du lien accommodation/convergence accommodative (méthode du Gradient, rapport AC/A mesuré). Nous avons utilisé la formule :

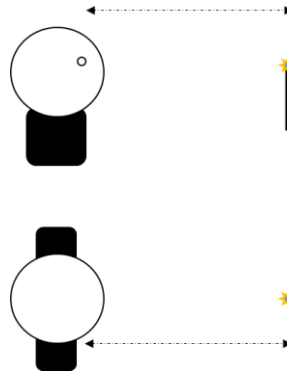
$$[(\text{Phorie VP avec } -1\delta) - (\text{Phorie VP avec } +1\delta)]/2$$

Les valeurs moyennes attendues sont de l'ordre de $2.5\Delta/\delta \pm 1.5$

Ces tests nous ont permis d'une part d'avoir la position de repos dissociée des axes visuels en vision de loin et en vision de près, nous apportant directement des informations importantes sur la vergence fusionnelle à mettre en jeu en temps normal pour réaligner les axes et permettre la fusion. D'autre part, nous avons aussi pu apprécier la force du lien accommodation/convergence, qui intervient pour beaucoup dans la réponse en vergence en vision proche. Ces critères interviennent pour beaucoup dans les classifications des désordres de vergence.

8.2.6. Evaluation de la vergence

- Test du Punctum Proximum de Convergence (PPC) : réalisé sans correction et à l'aide d'une cible de fixation comme un stylo lampe, ce test permet d'avoir une première évaluation des capacités de convergence du sujet.

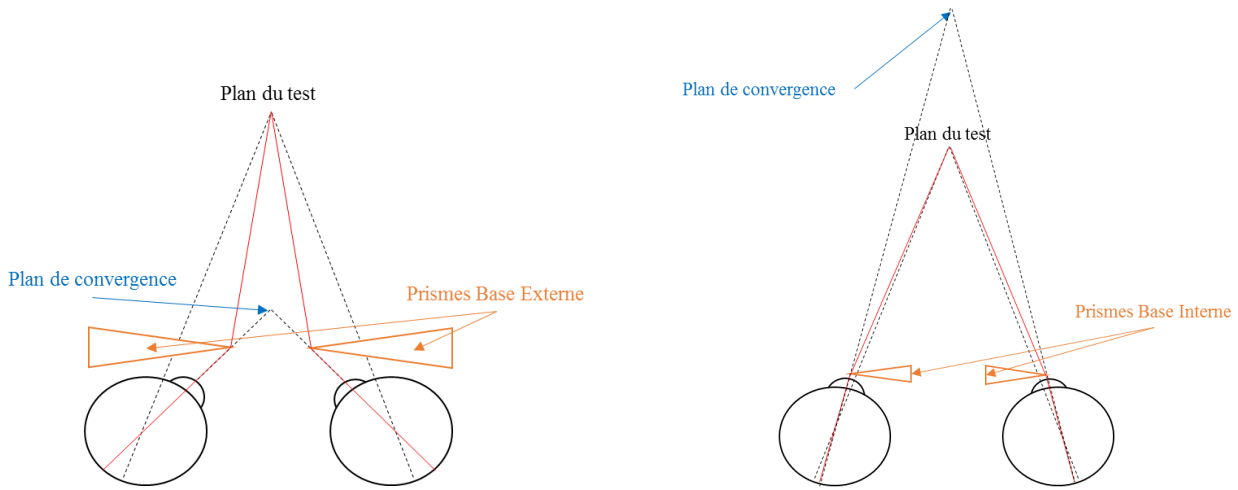


Représentation schématique de la manipulation du Punctum Proximum de convergence. La double flèche en pointillés montre la mesure prise en compte quand le sujet reportait voir la cible double.

On relève la plus courte distance (Punctum Proximum) à laquelle il perçoit encore la cible de façon simple par rapport à sa ligne de quanti, c'est-à-dire avant qu'il rapporte une vision double (subjectif) ou que nous constatons le bris d'un des deux yeux objectivement. On mesure ensuite, en éloignant la cible, la distance à laquelle le sujet récupère la vision simple (point de recouvrement), qui doit être de manière générale inférieure à deux fois la distance du bris et sert à évaluer les capacités de mise en jeu phasique de la vergence. Les valeurs moyennes établies par Scheiman et Wick (2014) pour leur classification font état d'un point de bris attendu à $2.5\text{cm} \pm 4$ et un point de recouvrement à $4.5\text{cm} \pm 3$. Il est à noter que d'autres praticiens et auteurs utilisent des normes moins strictes sur ce test.

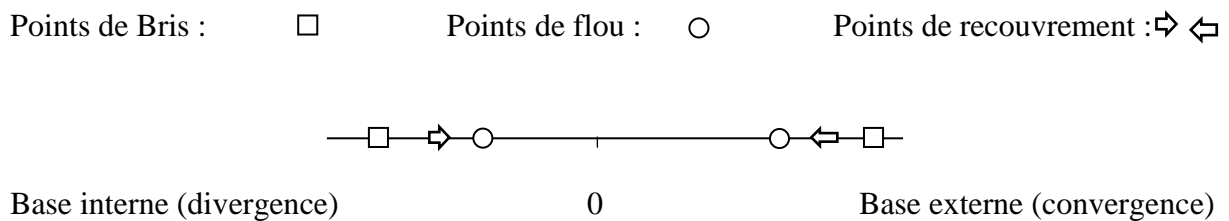
- Les réserves fusionnelles en convergence et en divergence (convergence relative positive et négative) ont été mesurées à l'aide des prismes rotatifs dont le phoropter RT-600 est équipé et en faisant fixer une ligne de lettre correspondant à 80% de l'acuité maximale du sujet. Les valeurs de prismes sont d'abord augmentées progressivement jusqu'à atteindre un éventuel « point de flou », pour lequel le sujet rapporte avoir perdu la netteté du test, puis jusqu'au « point de bris », pour lequel le sujet rapporte voir double. Les valeurs des prismes sont alors diminuées jusqu'à atteindre le « point de recouvrement » pour lequel le sujet rapporte revoir simple de nouveau. Tout est donc mesuré à partir du point 0, référence du début du test. Les

réserve en convergence sont testées avec des prismes bases externes ou temporales, les réserves en divergence sont testées avec des prismes bases internes ou nasales.



Représentation du test des réserves fusionnelles en convergence (figure de gauche) et divergence (figure de droite) en vue de dessus.

Les valeurs de prismes cumulées sur les deux yeux et observées pour chacun des « points » cités sont ensuite notées puis habituellement présentées de la sorte :



Exemple de représentation des résultats des réserves fusionnelles

Les valeurs moyennes et écarts types attendus (Scheiman et Wick, 2014) pour les sujets adultes sont rapportés en dioptries prismatiques (Δ) dans le tableau ci-dessous :

Distance	Limite	Convergence (Bext.)	Divergence (Bint.)
VL (5m)	<i>Flou</i>	9 \pm 4	X
	<i>Bris</i>	19 \pm 8	7 \pm 3
	<i>Recov.</i>	10 \pm 4	4 \pm 2
VP (40cm)	<i>Flou</i>	17 \pm 5	13 \pm 4
	<i>Bris</i>	21 \pm 6	21 \pm 4
	<i>Recov.</i>	11 \pm 7	13 \pm 5

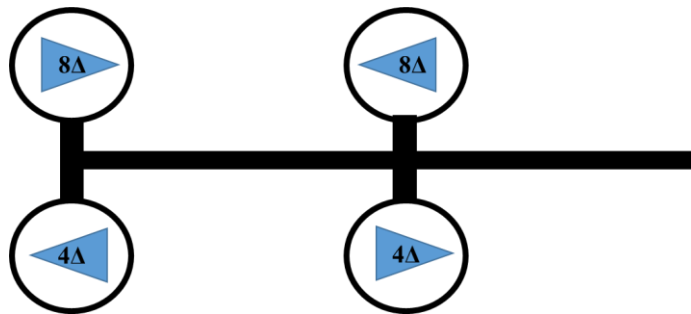
Critères de confort :

A partir des valeurs des convergences relatives positives et négatives, il est possible de calculer une première mesure physiologique correspondant au critère de confort de Percival (Sheedy et Saladin, 1978). Basé sur l'équilibre des réserves fusionnelles entre elles, il est un premier indicateur clinique du confort visuel concernant les vergences. Pour qu'il soit respecté, il faut délimiter la plage totale sur laquelle le sujet arrivait à voir simple et net en convergence et en divergence pendant le test, c'est-à-dire entre les deux « points de flou » lorsqu'ils étaient présents, ou entre les « points de bris » lorsque le flou n'était pas rapporté (Plage Totale de Vision Simple et Nette, VSN). Cette plage est ensuite divisée en 3 parties égales, et le point 0, de demande, doit donc se trouver dans le 1/3 milieu pour considérer que les réserves, entre-elles, sont équilibrées. Si tel n'est pas le cas, ce moyen est un indicateur supplémentaire pouvant être parfois utilisé dans les classifications de dysfonctionnements de la vergence. Nous l'avons calculé pour l'étude 1, mais il ne rentrait cependant pas en compte dans les signes diagnostiques des dysfonctionnements de la vergence que nous avons décidé d'utiliser (Scheiman et Wick, 2014).

Un deuxième critère, beaucoup plus utilisé dans les signes diagnostiques, est celui de Sheard (Sheedy et Saladin, 1978 ; Sheard, 1930). Celui-ci prend en compte la valeur de la phorie, déviation maintenue latente par un désir de fusion et corrigée en temps normal par un effort fusionnel, qui fait donc appel aux réserves du sujet. La valeur et le sens de la phorie désignent donc aussi, en théorie, la position du point de « repos physiologique » des axes visuels en l'absence de fusion. Pour ce critère, la valeur de la phorie ne doit pas excéder de deux fois la réserve concernée (en convergence, BExt., pour les exophores ; en divergence, BInt., pour les ésoophores). Si tel n'est pas le cas, le critère considère que le sujet ne présente pas de réserves fusionnelles suffisantes pour palier à sa phorie dans le temps. Il représente donc un critère caractéristique dans les signes de dysfonctionnement de la vergence. Pour faciliter son calcul, nous pouvons exprimer de façon différente l'amplitude des réserves fusionnelles du sujet en prenant pour référence la valeur de la phorie à la distance souhaitée. Nous avons, par la suite, pris le parti d'exprimer les réserves de cette façon dans l'étude 1, et avons utilisé les nomenclatures de désignation usuelles : réserve fusionnelle positive (RFP) pour l'amplitude allant de la phorie à la limite de vision nette et simple en convergence (BExt., au « point de flou », ou au « point de bris » quand le « point de flou » n'était pas rapporté) ; réserve fusionnelle négative (RFN) pour l'amplitude allant de la phorie à la limite de vision nette et

simple en divergence (BInt., au « point de flou » ou au « point de bris » quand le « point de flou » n'était pas rapporté).

- La flexibilité de vergence (rock prismatique) a été réalisée à l'aide de biface équipée de deux prismes de 8Δ base externe d'un côté et de deux prismes de 4Δ base interne de l'autre, ajoutée par-dessus les corrections.



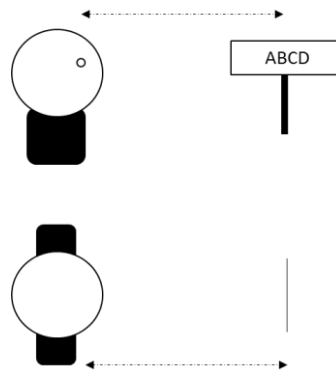
Biface utilisée pour réaliser le rock prismatique, forçant le sujet à converger (2 fois 8Δ base externe) puis à diverger (2 fois 4Δ base interne) fortement tout au long du test.

L'objectif était pour le sujet de voir simple et nette une cible correspondant à 80% de l'acuité maximale du sujet en vision de près (40cm) au travers des prismes le forçant à plus converger (base externe) ou diverger (base interne). Nous comptons le nombre de changements (1 cycle pour un passage sur les Bext. et les Bint.) réalisés en une minute, notions avec quels prismes le sujet présentait le plus de difficultés à réaliser la tâche, et pouvions ainsi apprécier sa flexibilité dans les variations brusques de demande de vergence. Les valeurs de prismes habituellement utilisées sont différentes (12Bext. / 3Bint.) avec une moyenne attendue de 15 cycles/minute ± 3 . Ici cependant, nous souhaitons exposer les sujets à de plus fortes variations, en relation aux autres expérimentations pratiquées par la suite (voir étude 2).

Ces tests cliniques nous ont permis d'apprécier précisément la qualité de la fonction de vergence chez nos sujets : l'amplitude maximale en espace réel (PPC), mesurée à l'aide de prismes (réserves fusionnelles) ou rapidité de la mise en jeu de la convergence et de la divergence (Rock prismatique). La plupart d'entre eux (PPC, réserves fusionnelles et critère de Sheard) étaient directement utilisés pour caractériser un dysfonctionnement de la vergence, en association avec d'autres tests et symptômes.

8.2.7. Evaluation de la fonction accommodative

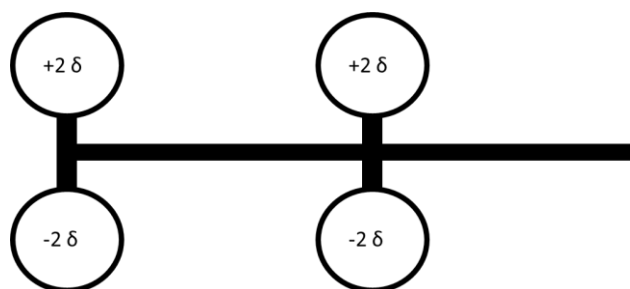
- Le positionnement accommodatif a été évalué de manière subjective au phoropter à l'aide de la méthode de la croix de Jackson associée aux Cylindres croisés fixes. Ces cylindres ont permis d'induire un astigmatisme mixte direct sur les deux yeux. Ainsi, en fixant une croix de Jackson à 40cm, ne présentant que des directions horizontales et verticales, il nous était possible de connaître le positionnement de l'accommodation en ajoutant des verres sphériques pour neutraliser l'effet. Les moyennes retrouvées avec cette méthode font état d'un retard accommodatif équivalent à $0.50\delta \pm 0.50$.
- Les accommodations relatives positives et négatives (ARN et ARP) ont été évaluées à l'aide du phoropter. Le sujet devait fixer une ligne de lettre équivalente à 80% de son acuité maximale. Pendant la manipulation de l'ARN, des verres convexes (positifs) étaient ajoutés par pas de 0.25δ sur les deux yeux, ce qui contraignait le sujet à relâcher progressivement son accommodation tout en maintenant son angle de vergence fixe. Pendant la manipulation de l'ARP, des verres concaves (négatifs) étaient ajoutés par pas de 0.25δ sur les deux yeux, ce qui contraignait le sujet à progressivement accommoder plus tout en maintenant son angle de vergence. Il devait nous avertir au premier flou constant ressenti ou dès qu'il voyait double, nous relevions alors la valeur totale des verres sphériques ajoutés. Plus celle-ci était importante, plus le sujet présentait de flexibilité accommodation/convergence. Les valeurs moyennes attendues sont de $+2.00\delta \pm 0.50$ pour la mesure de l'ARN et de $-2.37\delta \pm 1.00$ pour l'ARP.
- Les réserves accommodatives étaient évaluées en mesurant le Punctum Proximum d'Accommodation (PPA), point le plus proche pour lequel le sujet arrivait à percevoir une cible nette correspondant à 80% de son acuité maximale (testée à 40cm).



Représentation schématique de la manipulation du Punctum Proximum d'Accommodation. La double flèche en pointillés montre la mesure à partir prise en compte quand le sujet reportait voir la cible floue (ou double en condition binoculaire).

Nous avons utilisé pour ce faire la méthode de Donders, qui consistait à rapprocher progressivement la cible du sujet et noter la distance à laquelle il nous rapportait percevoir cette cible floue, mesurée depuis le cantus externe au centimètre près. Nous mesurons d'abord cette distance en monoculaire puis en binoculaire, et nous l'avons ensuite rapportée en dioptrie : plus la distance était courte, plus le résultat des réserves accommodatives du sujet était haut. Cette valeur était ensuite rapportée à la valeur attendue pour l'âge du sujet dans les cas de suspect d'insuffisance accommodative, et nous utilisons la formule d'estimation : Amplitude maximale = $15 - \text{age}/4$.

- La flexibilité accommodative (rock accommodatif) a été réalisée en condition binoculaire puis monoculaire à l'aide de biface $\pm 2\delta$ ajoutées par-dessus les corrections.



Biface utilisée pour réaliser le rock accommodatif, forçant le sujet à accommoder (verres négatifs) puis à relâcher l'accommodation (verres positifs) tour à tour, tout au long du test.

De la même façon que pour la flexibilité de la vergence, l'objectif était pour le sujet de voir simple et nette une cible correspondant à 80% de l'acuité maximale du sujet en vision de près (40cm) au travers des verres sphériques le forçant à plus accommoder

(verres négatifs) ou à moins accommoder (verres positifs). Nous comptons le nombre de changements (1 cycle pour un passage sur le + et le -) réalisés en une minute, notions avec quels verres le sujet présentait le plus de difficultés à réaliser la tâche, et pouvions ainsi apprécier sa flexibilité dans les variations brusques de demande d'accommodation. Les valeurs moyennes attendues chez l'adulte sont de 11 cycles/minute ± 5 pour le rock monoculaire et de 10 cycles/minute ± 5 pour le rock binoculaire.

Ces tests nous ont permis d'apprécier précisément la qualité de la fonction accommodative chez nos sujets. La plupart d'entre eux (ARN, ARP, PPA monoculaire, Rock accommodatif) étaient directement utilisés pour caractériser un dysfonctionnement de l'accommodation, en association avec d'autres tests et symptômes.

8.3. Ethique

Avant toute expérimentation, le protocole était clairement expliqué aux participants, ainsi que certains délais et autres rendez-vous à venir. Ils prenaient ensuite connaissance des détails sur une notice d'information résumant la procédure, puis remplissaient une notice de consentement de participation. Les études étaient incluses dans des protocoles ayant reçu auparavant un avis favorable du Comité de Protection des Personnes dont dépendait le lieu d'expérimentation, conformément à la Déclaration d'Helsinki (n°07035).

8.4. Critères d'inclusion

Nous avons décidé de n'inclure dans nos études que les étudiants ne présentant pas de pathologie, et donc d'exclure tout élément strabique et/ou amblyope, ou encore présentant une parésie ou paralysie d'un des nerfs moteurs responsables. Ils devaient de plus présenter une acuité visuelle supérieure ou égale à 8/10^{ème} une fois corrigé pour chaque oeil, ne pas avoir d'antécédents de pathologie oculaire pouvant affecter la perception ou la motricité, ne pas avoir de problèmes de vision des couleurs, ne pas présenter une phorie verticale de plus de 1 Δ lors des examens et ne pas présenter de maladie ou de désordre neurologique pouvant affecter les fonctions exécutives cognitives. Nous nous sommes assurés, par la même occasion, que les participants n'étaient pas sous traitements à visée neurologique, et qu'ils n'avaient pas d'historique d'accident cérébral ou de blessure crânienne.

8.5. Stimuli et cibles

Pendant nos expérimentations, nous avons été amenés à utiliser des cibles, en particulier un test de lecture (L'Alouette) et le test de Stroop.

Pour le test de lecture, nous avons choisi le test de l'Alouette, étalonné et référencé pour l'évaluation de l'âge lexical chez l'enfant et le dépistage de la dyslexie (Lefravrais, 1967 ; Debray et al., 1972 ; Sprenger-Charolles et al., 2009). Ce texte n'est cependant pas utilisé pour la compréhension, car il s'agit surtout d'un test de reconnaissance des mots et de codage graphème-phonème. Il contient 265 mots, dont certains sont peu employés dans la langue française, et l'ordre de ces mots est lui aussi inhabituel. L'histoire contée par le texte n'a pas de réel sens, les phrases mises bout à bout forment un ensemble compréhensible mais sans véritable signification, ce qui ne permet pas d'anticiper les mots qui vont être utilisés au préalable et oblige à aller les fixer dans leur majorité. Nous avons imprimé le test en taille de police 12 et sur un format A4. Pendant l'étude 1, il a été demandé aux participants de lire le texte à voix haute, car ici les mouvements oculaires n'étaient pas enregistrés. Il nous a été possible de relever une vitesse de lecture, en rapportant le nombre de mots lus (265) sur le temps total de passation, et de comptabiliser les hésitations et erreurs commises lors de la lecture, comme c'est habituellement fait chez l'enfant. Pendant l'étude 3, les saccades de lecture étaient cette fois enregistrées, et les participants ont cette fois lu le texte à voix basse, en nous avertissant en levant le doigt au démarrage et à l'arrivée. Dans les deux études, il a été demandé aux sujets de lire le plus naturellement possible le texte, sans bouger la tête.

Nous avons aussi utilisé le test de Stroop (Stroop, 1935 ; MacLeod, 1991) tel qu'il a été décrit précédemment, avec les trois épreuves classiques de lecture, dénomination des couleurs et interférence. Les couleurs utilisées étaient au nombre de 4 : rouge, bleu, vert et jaune. Concernant l'étude 1, nous avons utilisé les trois planches que nous avons au préalable imprimées sur un format A4. Chaque planche contenait 100 mots ou points de couleurs disposés aléatoirement sur une matrice de 10 lignes et 10 colonnes. L'espacement horizontal entre chaque stimulus était de 3.1cm et l'espacement vertical entre chaque ligne était de 1.7cm. Chaque lettre et chaque point de couleur était perçu sous une taille angulaire de 0.3°. Concernant l'étude 2, nous avons utilisé les trois planches que nous avons projetées sur écran, chaque planche contenant 80 stimuli disposés aléatoirement sur une matrice de 10 lignes et de 8 colonnes. L'espacement horizontal entre chaque stimulus était de 3.7cm et l'espacement

vertical entre chaque ligne était de 2cm. Chaque lettre et chaque point de couleur était perçu sous une taille angulaire de 0.4°.

Dans chacune des épreuves, il était demandé au sujet de réaliser la tâche le plus rapidement possible en faisant le moins d'erreur possible. S'il se rendait compte de l'une d'entre elle, il pouvait la corriger immédiatement. Pour la tâche de lecture, il fallait lire chacun des mots les uns après les autres, de gauche à droite et de haut en bas. Pour la tâche de dénomination, il fallait donner la couleur de chacun des points les uns après les autres et dans le même sens. Pour la tâche d'interférence, il fallait donner la couleur de l'encre dans lequel chaque mot était écrit, et non de lire le mot, pour chacun des mots, les uns après les autres et dans le même sens. Nous avons chronométré les étudiants pendant chacune des épreuves, et avons comptabilisé le nombre d'erreurs corrigées et non corrigées qu'ils avaient commises.

- Pour les résultats du test, il nous a d'abord été permis de calculer la vitesse globale de chaque participant en rapportant le nombre de stimuli lu (100 ou 80) sur le temps total de passation.

- Par la suite, nous avons utilisé la même formule que Kapoula et al. (2010) concernant le score d'erreur :

$$\text{Nombre d'erreurs corrigées} + (\text{nombre d'erreurs non corrigées}) \times 2$$

Une erreur non corrigée par le sujet devait représenter un poids plus important comparé à une erreur corrigée immédiatement. Un tel calcul est régulièrement appliqué car une erreur non corrigée témoigne d'une perte d'attention plus importante.

- Afin d'évaluer la flexibilité entre les différentes tâches de Stroop, nous nous sommes rapportés aux affirmations de MacLeod (1991) et Jensen et Rohwer (1966) expliquant que les différences de temps total de passation étaient les mesures les plus appropriées pour évaluer l'interférence de Stroop. Conformément à la formule utilisée par Stuss et al. (2001), nous avons récupéré les données concernant « l'effet de couleur » (ECo) et « l'effet d'interférence » (EI) comme décrit ci-dessous :

$$\text{ECo} = \text{Temps de Passation en dénomination} - \text{Temps de passation en lecture}$$

$$\text{EI} = \text{Temps de passation en interférence} - \text{Temps de passation en dénomination}$$

Pour l'étude 2, nous avons aussi pu calculer ces effets en utilisant les valeurs moyennes des durées de fixation pour chacune des tâches et dans chacune des conditions.

8.6. Enregistrement des mouvements des yeux

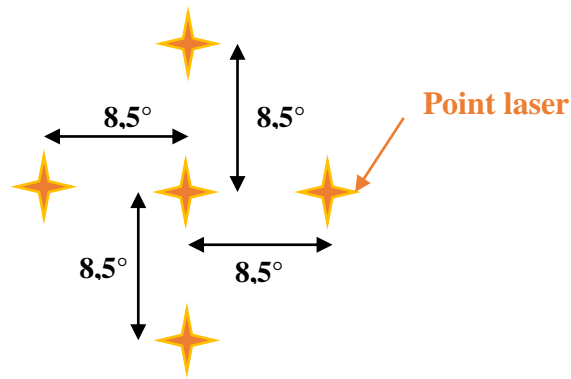
Pour les études 2 et 3, nous avons enregistré les mouvements oculaires avec le système de vidéo-oculographie (eye tracking) EyeSeeCam (University of Munich Hospital, Clinical Neuroscience, Munich, Allemagne, voir <http://eyeseecam.com/>). L'appareil est fixé sur un bandeau élastique qu'il fallait au préalable attacher autour de la tête du sujet étudié. Deux caméras miniatures infrarouges sont placées au niveau du front et orientées vers le bas. Grâce à deux lames semi-réfléchissantes accrochées à une armature en plastique et situées à hauteur des pommettes du sujet, les caméras pouvaient récupérer la position exacte de l'œil, notamment par l'intermédiaire de la détection de la position de la pupille, zone circulaire la plus sombre au sein de l'image récupérée, sans que cela gêne le sujet lorsqu'il regardait droit devant lui. Le champ de regard n'était ainsi que très peu tronqué. Les caméras permettaient d'enregistrer les signaux avec une fréquence d'échantillonnage de 222Hz et une résolution spatiale optimale de 0.01°. Outre sa précision, le deuxième intérêt réel d'EyeSeeCam était le fait que nous pouvions réaliser des mesures sans forcément utiliser d'outils pour immobiliser la tête du sujet, et plus particulièrement sa mâchoire. Le fait que cet appareil puisse être utilisé sans mentonnière représentait ici un avantage certain.

Le système EyeSeeCam est fourni avec des logiciels donnant en temps réel la position de la pupille de chaque œil. Il est aussi possible de le synchroniser avec les signaux de stimulation du REMOBI directement pendant l'enregistrement. Visualiser les positions horizontales et verticales pendant les différentes tâches visuelles effectuées a été rendu possible par ce biais et a permis d'éviter un maximum de perte de données ou de problème de calibration.

8.6.1. Calibration

Avant chaque manipulation, l'appareil devait être réglé et les caméras centrées pour capter correctement les informations, et nous devions réaliser un enregistrement de calibration horizontale et verticale avant de procéder aux enregistrements du sujet dans ses épreuves. Le sujet avait pour consigne de garder la tête immobile et rester à distance fixe d'un mur (3m). Des points lasers lui étaient projetés en face de lui directement depuis un émetteur situé exactement entre les deux caméras de l'appareil EyeSeeCam. Cinq points lasers formant une croix étaient disposés de telle sorte que le point central était situé à une amplitude de mouvement de 8.5° des autres points, orientés respectivement verticalement au-dessus et en dessous, et horizontalement à droite et à gauche. Le sujet avait pour consigne d'effectuer des

saccades pour aller fixer chaque point un à un, et que chaque saccade vers un point excentré devait se suivre d'une saccade vers le point central. Il démarrait en général par le point central, puis fixait le point de gauche, puis de nouveau le point central pour ensuite aller fixer le point du haut et continuer de façon similaire dans le sens des aiguilles d'une montre et pendant 15 secondes.



Cibles de calibration en « 5 points » de l'appareil EyeSeeCam

Quand une fixation était détectée, le logiciel d'EyeSeeCam récupérait ces données et faisait correspondre la position 2D de l'image vidéo de chaque œil à la position attendue pour chacun des points de fixation possible sur l'écran. Il corrigeait les distorsions possibles engendrées par un réglage de hauteurs ou d'horizontalité inexacte à l'aide d'une fonction biquadratique. Une vérification finale était effectuée avec 5 points pour déterminer la validité de la calibration. Si le sujet ne fixait pas correctement les points, ou pas suffisamment longtemps, ou encore s'il avait de trop bougé la tête pendant l'exercice, la vérification n'était pas favorable et nous devions la recommencer en réexpliquant au sujet ce qui lui était demandé.

Les fichiers de calibration étaient ensuite appliqués sur les tracés bruts des mouvements de chaque œil pendant les différentes épreuves grâce à un logiciel développé par Thomas Eggert (Ingénieur de Recherche à Ludwig-Maximilians-Universität München, Allemagne, et collaborateur de l'équipe). Nous récupérions donc les différents tracés des deux yeux sous format MatLab et dorénavant calibrés en unité « degré » et plus en données brutes. Les signaux étaient ensuite analysés et marqués à l'aide du logiciel Analyze32, développé ici encore par Thomas Eggert. La procédure de calibration « 5 points » était répétée avant chaque épreuve, de lecture ou du test de Stroop, cette fois à la distance où était projetée la cible par la suite, c'est-à-dire 40cm ou 50cm. Grâce au logiciel Analyze 32, nous pouvions dès lors récupérer et marquer ces données afin d'appliquer une deuxième calibration plus précise, en utilisant un calibrage polynomial (linéaire ou du second degré) sur les signaux horizontaux puis verticaux de chaque œil séparément.

Il est important de noter que la procédure de calibration a été réalisée de façon binoculaire, même si le traitement du signal se faisait ensuite sur chaque œil séparément. Le sujet avait

donc les deux yeux ouverts, et nous nous sommes surtout attardés sur les commandes motrices et sur la disconjugaison pendant les saccades. Il n'est pas exclu que pendant cette phase, les deux yeux ne fixaient pas exactement les points lasers et qu'une petite disparité de fixation soit retrouvée. Nous n'avons donc pas directement cherché à mesurer exactement les disparités de fixations, étant donné la calibration binoculaire, mais avons pu apprécier les changements de disparités et les variations de l'angle de vergence au cours du temps, pendant et après les saccades par exemple.

8.6.2. Signal conjugué et disconjugué

Afin de réaliser au mieux les analyses des mouvements de saccades et de vergence, il est utile de transformer les signaux relatifs à l'œil droit et à l'œil gauche dans les plans horizontaux et verticaux en signaux conjugués et disconjugués.

Le signal conjugué correspond au mouvement moyen des deux yeux et était calculé avec la formule $[(\text{position de l'œil gauche} + \text{position de l'œil droit}) / 2]$. Il témoigne directement des variations dans la direction du regard, et les conventions utilisées sont qu'une valeur positive du signal dénote un mouvement vers la droite et une valeur négative dénote un mouvement vers la gauche, le 0° étant la valeur de référence pour la direction « droit devant ». Un signal vertical, bien que moins utilisé pour nous, était lui aussi calculé. Une valeur positive témoignait d'un mouvement vers le haut quand une valeur négative rapportait un mouvement vers le bas.

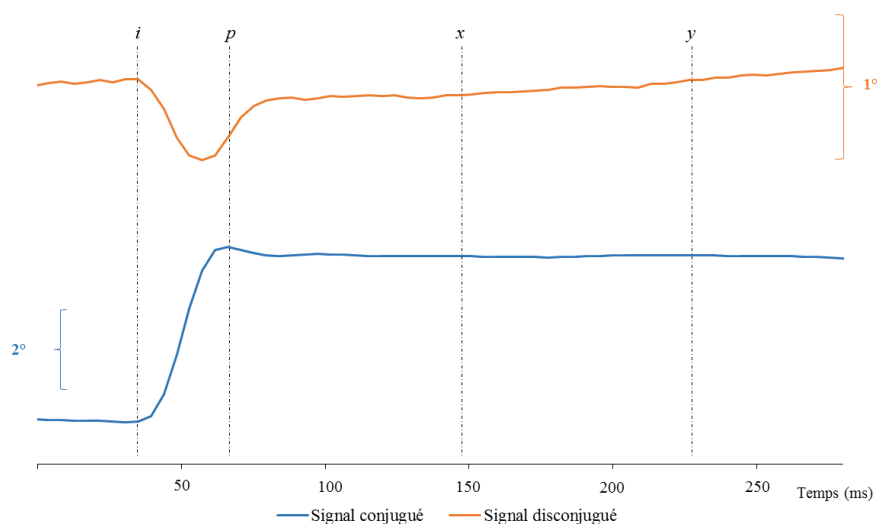
Le signal disconjugué rapportait directement la différence de mouvement des deux yeux et servait par la même occasion de signal relatif à l'angle de vergence, en particulier pendant les phases de fixation. Il était calculé avec la formule $[\text{position de l'œil gauche} - \text{position de l'œil droit}]$, et une variation positive représente donc par convention une augmentation de l'angle de vergence, donc un mouvement de convergence ou plus en convergence des axes visuels, quand une variation négative représente une diminution de l'angle de vergence, donc un mouvement de divergence ou témoignant d'un éloignement du plan de convergence par rapport à une position initiale.

Les signaux de vitesse étaient ensuite calculés à partir des signaux conjugués et disconjugués, utilisant un différenciateur symétrique à deux points, combiné à un filtre passe-bas gaussien

de fréquence 33Hz. Il était ainsi possible d'apprécier la vitesse du mouvement en tout point du signal, celle-ci était exprimée en °/s.

8.6.3. Marquage et paramètres

Les mouvements de saccades et de vergence ont été analysés et marqués avec des points de repères bien précis. Pour chaque saccade par exemple, nous appliquons 3 premières marques. La première indiquait le moment du pic de vélocité pendant la saccade, et il était ainsi possible d'en récupérer sa valeur exacte. A partir de cette donnée, deux autres marques pouvaient être placées : « i » indiquant le début de la saccade, premier moment où la vitesse dépassait 10% de sa vitesse maximale ; « p » indiquant la fin de la saccade, premier moment où la vitesse descendait sous le seuil de 10% de sa valeur maximale. Le début ou la fin d'un mouvement de vergence étaient par contre caractérisés par l'instant où la vitesse dépassait au-dessus ou en dessous du seuil de 5°/s.



Exemple de marquage d'une saccade horizontale sur un signal conjugué (bleu) et disconjugué correspondant (orange). Le marqueur « i » indique le début de la saccade, le marqueur « p » la fin de la saccade, les marqueurs « x » et « y » sont des marques post-saccadiques placées respectivement 80ms et 160ms après la fin de la saccade, pendant la fixation.

Ces trois marques étaient placées de façon automatique grâce au logiciel Analyze32, cependant ce marquage dépendait aussi des critères de vitesse maximale et minimale, de durée maximale et minimale ou de l'amplitude maximale ou minimale des saccades. Chaque marque était ensuite vérifiée manuellement afin de s'assurer de la cohérence de certains placements, spécifiquement si des clignements interféraient. Le marquage de la vergence était, lui, réalisé manuellement.

Il était possible, à partir de ces premières marques, de récupérer les informations concernant la direction et l'amplitude des saccades de lecture ou réalisées pendant le test de Stroop (signe et valeur de la différence entre « p » et « i » sur le signal conjugué), ainsi que leur durée (différence de temps entre « p » et « i ») et de leur vitesse (ratio de l'amplitude sur la durée). Grâce au signal disconjugué, il nous a aussi été possible d'apprécier la variation de l'angle de vergence entre le début et la fin de la saccade, en d'autres termes la disconjugaison du mouvement (différence entre « p » et « i »), qui nous renseigne sur la coordination des deux yeux pendant la saccade.

Il était enfin possible d'obtenir une mesure de la durée d'une fixation, et nous avons choisi pour cela la différence temporelle entre la marque « p » indiquant la fin d'une saccade et la marque « i » indiquant le début de la saccade suivante.

Des signaux post-saccadiques étaient ensuite ajoutés afin d'apprécier le comportement oculomoteur pendant les fixations. On constate en effet très souvent un glissement (*drift*) pendant cette période avant une stabilisation. Nous avons donc choisi d'apposer 2 marques supplémentaires : « x » positionnée 80ms après « p », et « y » positionnée 160ms après « p ». C'est en effet dans ces intervalles de temps, juste à la fin de la saccade, qu'il est possible et intéressant d'observer la glissade post-saccadique, tant du point de vue conjugué (position des axes visuels) que disconjugué (variation de l'angle de vergence ; Leigh et Zee, 2016 ; Vernet 2009). L'amplitude de la glissade post-saccadique conjuguée des deux yeux nous était donnée après 80ms par la différence entre les valeurs de « x » et « p », et après 160ms par la différence entre les valeurs de « y » et « p ». La variation de l'angle de vergence, *drift* ou glissade disconjuguée pendant la fixation, nous était donnée par la différence entre « x » et « p » après 80ms et entre « y » et « p » après 160ms en utilisant les valeurs données par le signal disconjugué.

Pour la deuxième étude, pendant laquelle l'enregistrement des mouvements oculaires a été réalisé et malgré la calibration binoculaire de l'eye tracker, il nous a aussi été possible d'apprécier la disparité de fixation, en d'autres termes la valeur de l'angle de vergence mesuré pendant la fixation et rapporté à la valeur de l'angle de vergence attendu pour la distance du test. Nous nous sommes servis du signal disconjugué et avons gardé pour mesure la moyenne des valeurs en « p », « x » et « y », que nous avons ensuite rapporté à la valeur de l'angle

attendu. Une disparité de fixation positive impliquait donc que les axes visuels se croisaient en avant de la cible, alors qu'une disparité négative impliquait l'inverse. Nous nous sommes servis de cette mesure comme d'un indicateur supplémentaire pour évaluer la stabilité de l'angle de vergence en début de fixation.

8.7. Analyses statistiques

Nous avons utilisé le logiciel STATISTICA pour réaliser l'ensemble des tests statistiques. Pour l'étude 1, nous avons d'abord effectué un test de normalité de la distribution de Shapiro-Wilk. La distribution n'était pas de type gaussien et ne respectait pas les conditions de normalité, nous avons donc utilisé des tests non-paramétriques lorsque nous avons décidé de comparer des groupes entre eux. Nous nous sommes d'abord attardés sur les corrélations possibles entre test concernant la qualité de l'accommodation et de la vergence en les considérant comme variables indépendantes, et vitesse de lecture et aptitudes au test d'interférence de Stroop, en les considérant comme variables dépendantes. Comme test post-hoc en cas de corrélation significative, nous avons appliqué une correction de Bonferroni, dépendante du caractère accommodatif ou de vergence du résultat de test étudié. Par la suite, après avoir scindé l'échantillon en différents sous-groupes, nous avons utilisé une ANOVA non-paramétrique de Kruskal-Wallis afin de comparer les résultats en lecture et lors du test de Stroop entre les groupes de sujets présentant des dysfonctionnements ou non, d'après la classification de Scheiman et Wick (2014). Pour une comparaison des groupes deux à deux en cas de différence significative, nous avons utilisé le test de Mann-Whitney.

Pour les études 2 et 3, les échantillons étant de tailles restreintes, nous n'avons donc utilisé que des tests non-paramétriques sur l'ensemble des études. Il s'agissait de mesures répétées lors du test de Stroop réalisé dans différentes conditions, ou du test de l'Alouette réalisé à plusieurs reprises avant et après une réhabilitation de la vergence. Nous avons donc utilisé une ANOVA non-paramétrique de Friedmann pour chacune des études. Etant donné l'échantillon restreint de l'étude 3 (9 participants) et afin de vérifier les résultats de l'ANOVA de Friedmann, nous avons réalisé une analyse de variance à 2 facteurs à partir des données que nous avons préalablement classées. Par la suite, pour une comparaison deux à deux en cas de résultats significatifs, nous avons utilisé le test de Wilcoxon. Enfin, afin de mieux apprécier les relations possibles entre amplitude de la disconjugaison pendant la saccade et glissement post-saccadique disconjugué, nous avons réalisé des corrélations de Spearman entre ces deux mesures au sein de la même saccade.

Nous avons considéré que les analyses atteignaient la significativité pour une valeur de $p < 0.05$, comme admis dans la littérature. Les résultats reportés et discutés par la suite se sont révélés significatifs lors des analyses statistiques.

ETUDE 1

L'incidence de la qualité de la vergence et de l'accommodation sur les performances en lecture et pendant le test de Stroop chez de jeunes adultes.

Introduction

Les dysfonctionnements de la vergence et de l'accommodation sont en général et avant tout connus pour être responsables de plaintes visuelles associées caractéristiques, telles que la diplopie (vision double) et/ou la vision floue intermittente, les maux de tête, les signes de fatigue visuelle (yeux rouges, douloureux, qui tirent, piquent...) ou encore les problèmes de concentration (Ciuffreda, 2002 ; Borsting et al., 2003). Un débat demeure cependant à propos de l'incidence que peuvent avoir ces dysfonctionnements sur la réussite scolaire. Il apparaît dans de récentes études que cet impact pourrait s'avérer plus important que prévu (Borsting et al., 2003 ; Shin et al., 2009) et provoquer frustration et évitement chez les jeunes enfants (Garzia, 1994 ; Castanes, 2003), en particulier concernant la lecture (Grisham et al., 2007 ; Hoffman, 1980), socle encore indispensable des futurs apprentissages. Si Maples (2003) et Vaughn et al. (2006) avancent, en utilisant les mêmes méthodes de dépistage subjectif, que l'importance de la symptomatologie visuelle impacte de façon significative les performances scolaires et que ce facteur est plus à prendre au sérieux que celui des origines ethniques ou socio-économiques, le débat reste ouvert aujourd'hui. En lien avec cela, un dysfonctionnement accommodatif apparaît cependant avoir moins d'impact (Kedzia et al., 1999 ; Kiely et al., 2001 ; Blika et al., 1982) qu'un dysfonctionnement de la vergence (Eames, 1934 ; Park and Burri, 1943 ; Palomo-Alvarez et Puell, 2010, Cohen et al., 2010 ; Ayton et al., 2009).

La prévalence des dysfonctionnements de l'accommodation et de la vergence montre que ces désordres sont plus souvent rencontrés qu'on ne le pense, en particulier chez les jeunes adultes et étudiants (Hokoda, 1985 ; Porcar et Martinez-Palomera, 1997 ; García-Muñoz et al., 2016). C'est particulièrement le cas de l'insuffisance de convergence (IC), avec une prévalence moyenne de 5% chez enfants et adultes (Cooper et Jamal, 2012). L'IC a initialement été définie par Duane (1886) et peut être dépistée à travers plusieurs tests caractéristiques, comme une exophorie plus importante en vision de près qu'en vision de loin, un punctum proximum de convergence éloigné à plus de 7.2cm et un déficit dans les réserves fusionnelles en convergence en vision proche. L'IC est susceptible d'entraîner des plaintes

visuelles caractéristiques pendant les activités en vision rapprochée (Rouse et al., 2009), et son impact se retrouve aussi sur l'aspect oculomoteur. La coordination des deux yeux pendant les mouvements de saccades (Bucci et al., 2006 ; Bucci et al., 2011 ; Gaertner et al., 2013) et pendant les mouvements de vergence pure (Alvarez et Kim, 2013 ; Alvarez et al., 2014) est significativement moins bonne chez les sujets diagnostiqués en IC que chez des sujets contrôles. Cette coordination altérée peut donc potentiellement avoir un impact sur la qualité de la lecture, souvent effectuée en vision rapprochée, lorsqu'il est nécessaire de maintenir un angle de vergence stable tout en effectuant des saccades sur le texte et en mobilisant ses ressources attentionnelles.

A ce titre, l'IC a très souvent été associée à des problèmes attentionnels (Kent et Steeve, 1953 ; White et Brown, 1939) et il apparaît une plus forte prévalence de ce désordre chez les populations diagnostiquées avec un déficit attentionnel lié à l'hyperactivité (ADHD ; Granet, 2005). Borsting et al. (2005 et 2007) ont montré par ailleurs que les symptômes liés à l'hyperactivité et au déficit attentionnel étaient rencontrés de façon plus importante chez les enfants diagnostiqués en insuffisance de vergence ou accommodative. Or, la capacité à maintenir son attention sur un objet ou une tâche sans se laisser distraire ou se décourager est essentielle pour mobiliser efficacement les processus cognitifs de haut niveau comme la mémoire de travail (Diamond, 2013). Ces processus font référence aux fonctions exécutives cognitives (Miyake et al., 2000), et celle de l'inhibition permet un approfondissement concernant le fonctionnement des ressources attentionnelles. Récemment, Protopapas et al. (2007) ont montré que les enfants rencontrant des difficultés en lecture présentaient aussi de mauvais scores lors du test d'interférence de Stroop (Stroop, 1935 ; MacLeod, 1991), pendant lequel il est demandé au sujet d'inhiber une réponse de lecture au profit d'une réponse moins habituelle (ici de nommer la couleur de l'encre dans laquelle le mot fixé est écrit). Des résultats similaires avaient déjà été retrouvés (Everatt et al., 1997 ; van der Shoot et al., 2000). Des performances diminuées dans le domaine de l'inhibition ont par ailleurs été observées en utilisant d'autres tests que celui de Stroop chez des sujets présentant des difficultés en lecture, et plus particulièrement dans la compréhension (Cain, 2006 ; Borella et al., 2010). De surcroît, une récente étude d'Ikeda et al. (2013) est venue confirmer la relation entre interférence de Stroop et symptômes relatifs au déficit attentionnel et au trouble de l'hyperactivité.

De ce fait, l'interférence de Stroop est donc un outil nous permettant ici, à partir de stimuli visuels, d'avoir une mesure reflétant les capacités d'inhibition et d'attention de nos sujets.

Etant donné le lien existant entre oculomotricité et processus attentionnels (Rizolatti et al., 1987), nous posons ici l'hypothèse que les dysfonctionnements de l'accommodation et/ou de la vergence peuvent avoir un impact sur la qualité de la lecture et sur les fonctions exécutives cognitives. Notre intérêt majeur sera donc d'abord d'étudier les corrélations possibles entre les résultats de lecture, du test de Stroop et les mesures cliniques concernant la qualité de la vergence et de l'accommodation. Par la suite, isoler dans notre échantillon les sujets ne présentant aucun dysfonctionnement des sujets en présentant, tout en prenant en compte leur symptomatologie pourra possiblement expliquer d'éventuelles corrélations significatives retrouvées précédemment. Nous avons donc décidé d'utiliser le test de L'Alouette comme test référence de lecture et le test de Stroop. Les questions auxquelles nous tenterons de répondre seront donc les suivantes :

- Chez de jeunes adultes en bonne santé, quelles peuvent être les corrélations entre aptitudes visuelles en vergence et/ou accommodation et vitesse de lecture, testée avec L'Alouette et la planche de lecture du test de Stroop ?

- Chez de jeunes adultes en bonne santé, quelles peuvent être les corrélations entre aptitudes visuelles en vergence et/ou accommodation et fonctions exécutives cognitives, testées avec les épreuves de Stroop ?

- Existe-t-il une différence dans les performances de lecture ou d'interférence de Stroop entre les groupes de jeunes adultes asymptomatiques et ne présentant aucun dysfonctionnement accommodatif/binoculaire et les groupes de jeunes adultes symptomatiques en présentant ?

Nous émettons l'hypothèse qu'un dysfonctionnement de la vergence, potentiellement interférant avec le maintien de la vision simple, aura plus d'impact négatif qu'un dysfonctionnement de l'accommodation sur les capacités de lecture et sur les fonctions exécutives cognitives testées par le test de Stroop.

Méthode

Sujets

Pour cette étude, nous avons fait appel aux étudiants en optique volontaires du *Lycée des métiers de l'optique Fresnel* à Paris. Cinquante-et-un d'entre eux (17 hommes, 34 femmes) rentraient dans les critères d'éligibilité de l'étude et étaient tous âgés entre 18 et 24 ans (moyenne 20.45 ± 1.25 ans). Tous les sujets présentaient une vision binoculaire normale : un minimum de 8/10^{ème} d'acuité pour chaque œil une fois corrigé, aucun signe d'amblyopie ou de strabisme et pas de désordre neurologique rapporté. Ces mêmes sujets ne devaient pas présenter de phorie verticale de plus de 1 dioptrie prismatique (DP, Δ), aucun antécédent de pathologie oculaire ou de chirurgie susceptible d'affecter l'acuité visuelle ou la motilité oculaire, et aucun signe d'anomalie de la perception des couleurs (vérifié avec les planches d'Ishihara), car ceci aurait pu ici encore les perturber à réaliser normalement le test de L'Alouette et le test de Stroop.

Procédure

Les différentes étapes de l'examen optométrique ont été détaillées dans la méthodologie générale, nous ferons ici un retour sur chacune d'entre elles.

Chaque participant devait d'abord remplir un questionnaire sur ses antécédents de pathologies ou traumatismes oculaires ou de traitement pouvant avoir une incidence sur sa vision. L'échelle subjective de symptomatologie CISS (Convergence Insufficiency Symptom Survey ; Rouse et al., 2009) leur était aussi proposée conjointement, et nous obtenions pour chacun d'entre eux un score reflétant leur symptomatologie. Par la suite, la réfraction objective était mesurée à l'aide de l'autoréfracteur ARK-1 Nidek et était vérifiée subjectivement à l'aide du phoropter Nidek RT-600 (méthode du brouillard et vérification de l'astigmatisme, équilibre bioculaire et binoculaire jusqu'à l'obtention de la correction maximum convexe de meilleure acuité à 5m). Chaque mesure prise par la suite l'a été avec le sujet portant ses corrections optimales, que cela soit avec le phoropter ou la lunette d'essai (Oculus Adult UB4, Zeiss).

Comme détaillé dans la méthodologie générale, il a été relevé chez chaque participant des mesures relatives à son acuité visuelle, sa vision binoculaire et son sens stéréoscopique, ses phories et la force de son lien convergence/accommodation, ainsi que ses capacités de vergence et d'accommodation.

Classification

Les résultats des tests nous ont permis de réaliser une classification de notre échantillon calquée sur celle de Scheiman et Wick (2014) concernant les désordres binoculaires non strabiques et les dysfonctionnements accommodatifs. Nous nous sommes basés sur les mêmes critères que pour les études de Porcar and Martinez-Palomera (1997) et Shin et al. (2009). La classification de l'échantillon, ainsi que les valeurs moyennes et écart-types retrouvés pour chacun des tests déterminant au diagnostic sont rapportés dans la Table 1 : le groupe 1 (N=21) ne présentait aucun dysfonctionnement de vergence et/ou d'accommodation (VBN + ADA) ; le groupe 2 (N=8) présentait une insuffisance de convergence (IC) qui n'était pas associée à un désordre accommodatif ; le groupe 3 (N=2) présentait à la fois une insuffisance de convergence (IC) et une insuffisance accommodative (IA) ; le groupe 4 (N=3) présentait un excès de convergence qui n'était pas associé à un désordre accommodatif ; le groupe 5 (N=2) présentait une ésochorie basique (EB) qui n'était pas associée à un désordre accommodatif ; le groupe 6 (N=11) présentait un excès accommodatif qui n'était pas associé à un désordre de la vergence et le groupe 7 (N=2) présentait une inertie accommodative (InA) qui n'était pas associé à un désordre de la vergence. Un sujet présentait à la fois une ésochorie basique et une insuffisance accommodative (EB+IA), un autre sujet présentait à la fois une insuffisance de convergence et un excès accommodatif (IC+EA).

Tests expérimentaux

A la suite cet examen, nous demandions à chaque sujet d'accomplir une lecture à voix haute du test de L'Alouette, puis de réaliser le test de Stroop dans son ensemble, avec les planches de lecture, de dénomination et d'interférence. Les spécificités de la passation de ces tests ainsi que les calculs relatifs à leurs résultats ont été détaillés dans la méthodologie générale.

	G 1 VBN+ ADA	G 2 IC	G3 IC+IA	G 4 EC	G 5 EB	G6 EA	G 7 InA	IC+ EA	EB+ IA
N	21	8	2	3	2	11	2	1	1
Score CISS	12.52 (±6.83)	21.5 (±6.57)	26 (±12.73)	14.33 (±15.31)	21 (±1.41)	19.27 (±11.57)	12 (±12.73)	35	20
PPC (cm)	7.93 (±3.78)	10.5 (±2.98)	14.5 (±2.12)	10.33 (±5.13)	8.5 (±4.95)	6.55 (±2.58)	8 (±2.82)	12	12
Phorie VL (Δ)	0.98 (±3.78)	-2.43 (±1.92)	-1 (±1.41)	5.66 (±4.48)	9.5 (±2.12)	-0.36 (±2.00)	0.5 (±0.71)	2	2
RFN VL (Δ)	11.74 (±5.57)	7.56 (±2.38)	13 (±7.07)	11.67 (±5.84)	20 (±4.24)	8.82 (±1.74)	15 (±5.66)	9	10
RFP VL (Δ)	11.31 (±4.91)	10.69 (±4.17)	12 (±5.66)	12.33 (±8.13)	5.5 (±6.36)	12.09 (±7.72)	9.5 (±4.95)	4	6
Phorie VP (Δ)	-0.76 (±3.08)	-8.75 (±3.74)	-8 (±2.83)	9.33 (±7.37)	8.25 (±0.35)	-2.27 (±3.07)	-2.5 (±6.36)	-7	3.5
RFN VP (Δ)	15.76 (±5.09)	6.86 (±3.19)	6.5 (±7.78)	19 (±3)	19.75 (±0.35)	11.73 (±4.54)	11.5 (±0.71)	10	9.5
RFP VP (Δ)	23.33 (±6.62)	22.5 (±7.08)	17.5 (±0.71)	23.33 (±2.89)	15.75 (±8.83)	24.45 (±5.01)	24.5 (±6.36)	13	18.5
Cal. AC/A (Δ/D)	5.32 (±1.34)	3.5 (±0.89)	3.2 (±0.57)	7.47 (±1.2)	5.5 (±0.99)	5.24 (±0.85)	4.8 (±2.26)	2.4	6.6
Gradient AC/A (Δ/D)	3.42 (±1.63)	2.78 (±0.69)	1.38 (±0.88)	4.67 (±2.02)	5.25 (±0.35)	3.5 (±1.79)	2.75 (±0.35)	1.5	4.5
PPA mono. (D)	10.63 (±2.83)	9.52 (±1.19)	4.66 (±0.86)	8.96 (±3.92)	10.57 (±2.38)	10.29 (±1.27)	8.96 (±0.8)	8.69	7.77
PPA bino. (D)	12.58 (±2.71)	6.5 (±4.02)	5.99 (±1.39)	10 (±4.29)	13.33 (±4.71)	12.41 (±2.17)	11.52 (±2.15)	10	9.52
Rock acc. Mono. (c./min)	11.17 (±5.66)	7.66 (±4.73)	1.5 (±1.41)	10.17 (±1.26)	9.5 (±12.73)	2.52 (±1.65)	2.25 (±1.06)	0.75	3.25
Rock acc. Bino. (c./min)	9.40 (±4.63)	6.5 (±4.02)	0.5 (±0)	5.33 (±4.25)	12 (±11.31)	2.59 (±2.92)	2 (±0)	0.5	5
Rock prism. (c./min)	10.62 (±3.79)	8.31 (±3.81)	4.25 (±5.30)	5.5 (±4.44)	13.75 (±7.42)	10.5 (±4.69)	6.25 (±1.06)	0.5	5.5
ARN (D)	1.9 (±0.35)	1.69 (±0.46)	1.63 (±0.88)	2.25 (±0.43)	2 (±0)	1.61 (±0.26)	1.75 (±0)	0.75	2.25
ARP (D)	2.45 (±1.28)	5.5 (±1.41)	5.5 (±1.41)	1.08 (±0.76)	1.25 (±0.35)	2.57 (±1.40)	2.63 (±2.65)	4	1.5

Table 1 : Moyennes et écarts-types des résultats aux différents tests optométriques. (PPC : Punctum Proximum de Convergence ; RFN : Réserves Fusionnelles Négative ; RFP : Réserves Fusionnelles Positives ; Cal. AC/A : Rapport AC/A calculé ; Gradient AC/A : mesure du rapport AC/A par méthode du gradient ; PPA Mono : Punctum Proximum d'Accommodation Monoculaire ; PPA Bino : Punctum Proximum d'Accommodation Binoculaire ; Rock Acc. Mono. : Rock Accommodatif Monoculaire ; Rock Acc. Bino. : Rock Accommodatif Binoculaire ; Rock Prism. : Rock Prismatique). Les valeurs sont données pour chacun des groupes (VEN + ADA : Aucun désordre V/A ; IC : Insuffisance de Convergence ; IC+IA : Insuffisance de convergence et Insuffisance accommodative ; EC : Excès de convergence ; EB : Esophorie basique ; EA : Excès accommodatif ; InA : Inertie accommodative ; IC+EA : Insuffisance de convergence et Excès accommodatif ; EB + IA : Esophorie Basique et Insuffisance Accommodative.

Résultats

Résultats relatifs aux tests de lecture et au test de Stroop

Les moyennes et écart-types de l'échantillon concernant les résultats des tests de L'Alouette et des différentes épreuves du test de Stroop sont exposés sur la Table 2 (les écart-types sont indiqués entre parenthèses). Comme anticipé, les vitesses de lecture (en mots/minute) pendant l'épreuve de L'Alouette et l'épreuve de lecture du test de Stroop étaient significativement corrélées ($R^2 = 0.49$, $p < 0.001$).

	Lecture de L'Alouette	Epreuve Lecture de Stroop	Epreuve Dénomination de Stroop	Epreuve Interférence de Stroop	Effet de couleur (ECo, Stroop)	Effet d'interférence (EI, Stroop)
Temps de passation (s)	107.8 (±53.51)	41.83 (±6.78)	60.83 (±10.91)	93.89 (±19.33)	19 (±8.16)	33.06 (±11.25)
Score d'erreur	11.23 (±7.45)	0.15 (±0.41)	1.51 (±2.06)	3.91 (±3.36)	XXX	XXX

Table 2 : Moyennes et écarts-types (entre parenthèses) des résultats de l'échantillon entier au test de l'Alouette et au test de Stroop. Les effets de couleur et effet d'interférence sont représentés.

Corrélations entre symptomatologie, vitesse de lecture et effet d'interférence de Stroop

La régression linéaire montre une corrélation légère mais significative entre le score de symptomatologie calculé avec le CISS et la vitesse de lecture calculée lors de l'épreuve de lecture du test de Stroop ($R^2 = 0.08$, $p < 0.05$) : plus la symptomatologie rapportée était importante, plus la vitesse de lecture était basse, ce qui pourrait témoigner d'un lien déjà très discuté entre difficulté de lecture et symptômes liés à la vision. Cependant, aucune corrélation significative n'a été retrouvée entre ce même score et la vitesse de lecture pendant le test de L'Alouette. Cette première corrélation est donc à relativiser ici, la tâche de L'Alouette correspondant plus à ce qui est usuellement demandé lors de la lecture que l'épreuve de lecture du test de Stroop, ne contenant que des mots désignant des couleurs et également espacés. La régression linéaire montre aussi une corrélation moyenne mais significative entre le score de symptomatologie calculé avec le CISS et l'effet d'interférence ($R^2 = 0.11$, $p < 0.03$, voir Fig. 1).

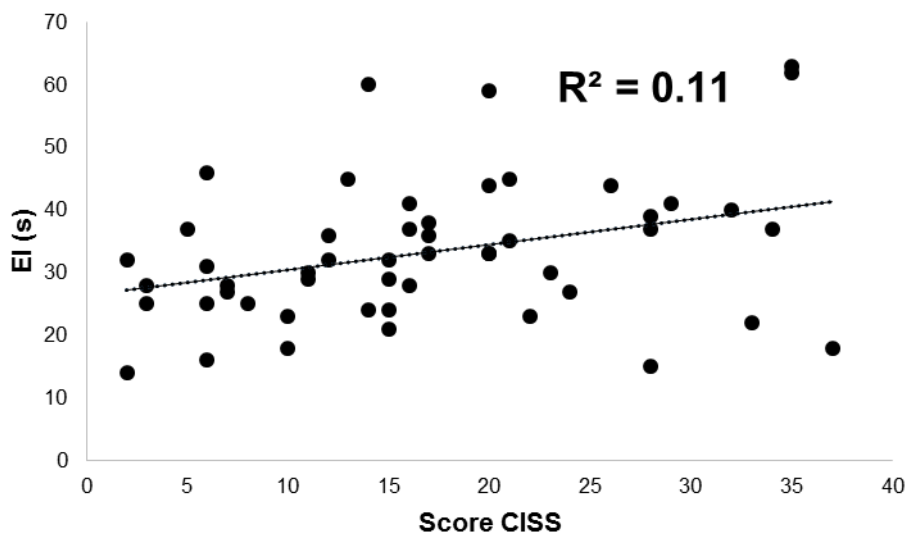


Fig. 1 : Effet d’interférence (s) en fonction du score de symptomatologie évalué avec l’échelle CISS. Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson est indiqué sur le graphique (R^2) ainsi que la droite de tendance (en pointillés).

Pour analyser l’incidence des symptômes reportés en vision de près évalués avec l’échelle CISS sur la vitesse de lecture ou sur les résultats du test de Stroop, nous avons décidé de diviser notre échantillon en 2 groupes : un groupe considéré comme asymptomatique, qui reportait un score inférieur à 16 au CISS, et un groupe considéré comme symptomatique, qui reportait un score de 16 ou supérieur à cette même échelle. Cette valeur limite rapportée par Rouse et al. (2009) représente le seuil à partir duquel un dysfonctionnement de la vergence peut être sérieusement considéré. Vingt-six participants (50.98%) étaient donc classifiés dans le groupe asymptomatique et vingt-cinq autres (49.02%) étaient quant à eux considérés comme symptomatiques. Le test non-paramétrique de Mann-Whitney n’a pas montré de différence significative entre les moyennes des deux groupes en termes de vitesse de lecture pendant l’épreuve de lecture du test de Stroop (149.27 ± 24.53 pour les sujets asymptomatiques contre 144.86 ± 23.69 pour les sujets symptomatiques ; $U=291$, $p=0.52$), mais a cependant révélé une différence significative entre les deux groupes en termes d’effet d’interférence ($29.48s \pm 9.92$ pour les sujets asymptomatiques contre $36.92s \pm 11.90$ pour les sujets symptomatiques ; $U=184.5$, $p<0.01$). La relation entre vitesse de lecture et symptomatologie paraît donc difficilement vérifiable ici. Cependant, lorsque la tâche cognitive se complexifie comme dans le cadre du test de Stroop, l’incidence des symptômes rencontrés en vision proche suggère un impact plus important et un effet d’interférence significativement allongé chez les sujets considérés comme symptomatiques.

Corrélations entre résultats optométriques, vitesse de lecture et résultats du test de Stroop.

Comme décrit dans la méthodologie générale, chaque paramètre mesuré lors de la tâche de L'Alouette et le test de Stroop a été corrélé avec chaque mesure réalisée lors de l'examen des vergences et de l'accommodation (score CISS, PPC, Phorie VL et VP, réserves fusionnelles en convergence et en divergence VL et VP, le PPA monoculaire et binoculaire, le rock accommodatif monoculaire et binoculaire, le rock prismatique, les ARN et les ARP). Aucune corrélation significative n'a été retrouvée entre l'effet de couleur (ECo) du test de Stroop, les scores d'erreurs pendant les épreuves de dénomination et d'interférence de Stroop et les résultats optométriques ($p > 0.05$). Les résultats complets de ces régressions linéaires (r^2) pour l'échantillon entier sont présentés dans la Table 3, et les corrélations significatives y sont indiquées en caractères gras et par un astérisque.

Test réalisé	Résultats de l'échantillon		Coefficients de corrélation de Bravais Pearson (r ²)				
	Moyenne	Ecart-type	Alouette Reading speed	ER Alouette	Stroop Reading speed	ER Stroop reading	Stroop IE
Score CISS	16.92	9.59	<0.01	0.01	0.08*	0.02	0.11*
PPC (cm)	8.62	3.72	<0.01	0.02	0.01	<0.01	0.09*
Phorie VL (Δ)	0.66	3.76	<0.01	0.01	<0.01	0.02	<0.01
VSN VL (Δ)	21.78	7.21	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01
RFN VL (Δ)	10.86	4.95	0.01	<0.01	0.03	<0.01	<0.01
RFP VL (Δ)	10.92	5.64	0.04	<0.01	0.07	0.02	0.02
Phorie VP (Δ)	-1.80	5.67	0.01	<0.01	0.03	0.03	0.01
VSN VP (Δ)	35.75	8.80	0.01	0.02	0.03	<0.01	0.18*
RFN VP (Δ)	13.08	5.77	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.06
RFP VP (Δ)	22.67	6.21	0.04	0.06	0.06	<0.01	0.16*
ARN (D)	1.80	0.41	0.02	<0.01	0.05	0.02	<0.01
ARP (D)	2.53	1.47	0.01	0.07	<0.01	0.03	<0.01
PPA Mono. (D)	9.89	2.47	<0.01	0.01	0.04	0.06	0.13*
PPA Bino. (D)	11.89	2.84	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.11*
Rock accommodatif mono. (c./min)	7.54	5.95	0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
Rock accommodatif bino. (c./min)	6.45	5.19	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	0.01
Rock prismatique (c./min)	9.33	4.55	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.04

Table 3 : Moyennes et écarts-types des résultats de l'échantillon entire aux tests optométriques. Les coefficients de corrélation de Bravais-Pearson entre les mesures de chaque test et les résultats en lecture sont présentés sur la partie droite. Les valeurs significatives (p<0.05) sont indiquées en gras et pas une astérisque (*).

A la suite, nous allons présenter les principaux résultats :

Résultats en lecture et mesures des aptitudes en vergence et en accommodation

Nous n'avons retrouvé aucune corrélation significatives ($p > 0.05$), que cela soit entre la vitesse de lecture, le nombre d'erreurs corrigées ou non corrigées ou le score d'erreurs total et les résultats optométriques.

Effet d'interférence et qualité de la vergence

La régression linéaire montre une corrélation moyenne mais significative entre les réserves fusionnelles en convergence en vision de près (RFP VP) et l'effet d'interférence (EI) ($R^2=0.16$, $p < 0.004$) ainsi qu'entre les réserves fusionnelles en convergence et en divergence associées en vision de près (VSN VP) et l'effet d'interférence (EI) ($R^2=0.18$, $p < 0.002$) lors du test de Stroop : dans les deux cas, plus les réserves étaient élevées, plus l'effet d'interférence était court, témoignant d'une meilleure performance pendant la tâche d'inhibition par rapport à la tâche basique de dénomination des couleurs.

De façon similaire, la régression linéaire montre une corrélation moyenne mais significative entre les résultats du Punctum Proximum de Convergence (PPC) et l'effet d'interférence (EI) ($R^2=0.09$, $p < 0.03$) : plus le PPC était court, témoignant d'une bonne qualité de la convergence, plus court était l'effet d'interférence.

En appliquant une correction de Bonferroni concernant les tests relatifs à la réponse de vergence en vision de près (PPC, RFN, RFP, Phorie VP, Rapport AC/A calculé, Rock accommodatif binoculaire et Rock prismatique), les valeurs de p se devaient d'être inférieures à 0.007 pour rester significatives. En l'état, les corrélations entre les résultats des réserves fusionnelles en convergence (RFP VP) et de l'effet d'interférence (EI) ainsi qu'entre les résultats des réserves fusionnelles totales (VSN VP) et de l'effet d'interférence (EI) sont restées significatives (voir Fig. 2 et 3). Ces résultats suggèrent que plus la réponse en convergence est de bonne qualité en vision de près, meilleure sera la performance d'inhibition testée par le test de Stroop.

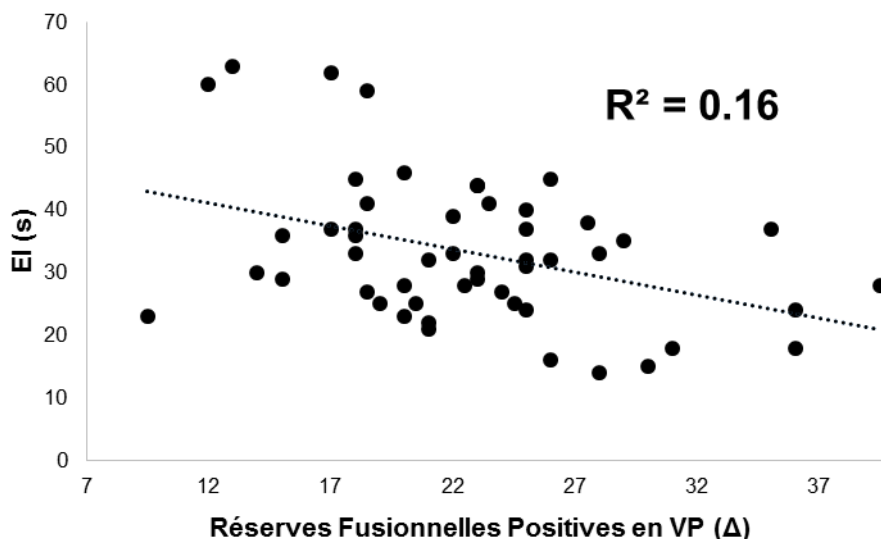


Fig 2 : Régression linéaire de l'effet d'interférence (EI, secondes) en fonction des réserves fusionnelles en convergence en vision de près (en Δ). Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson est indiqué sur le graphique (R^2) ainsi que la droite de tendance (en pointillés).

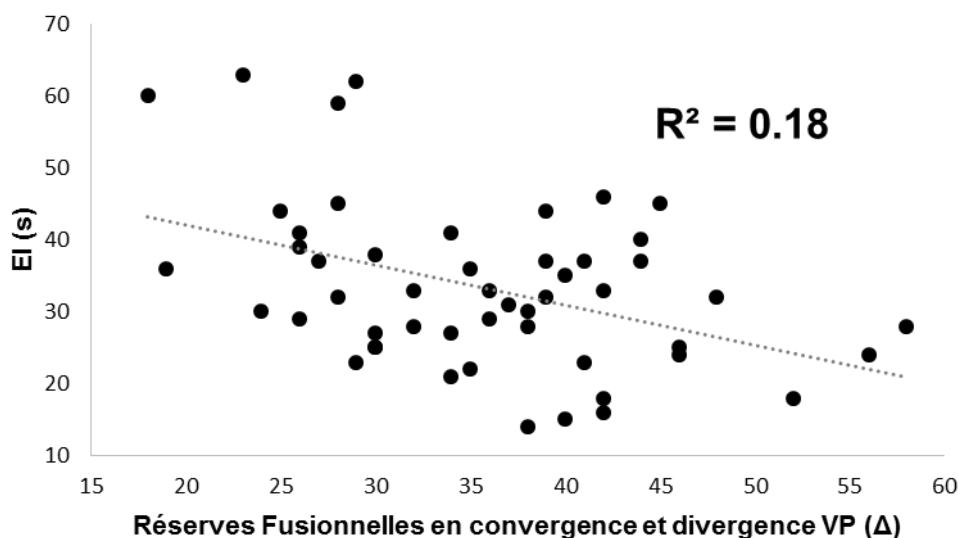


Fig 3 : Régression linéaire de l'effet d'interférence (EI, secondes) en fonction des réserves fusionnelles en convergence et en divergence en vision de près (en Δ). Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson est indiqué sur le graphique (R^2) ainsi que la droite de tendance (en pointillés).

Effet d'interférence et qualité de l'accommodation

La régression linéaire montre une corrélation moyenne mais significative entre les réserves accommodatives monoculaires (PPA mono) et l'effet d'interférence (EI) ($R^2=0.13$, $p<0.01$) ainsi qu'entre les réserves accommodatives testées binoculairement (PPA bino) et l'effet

d'interférence (EI) ($R^2=0.11$, $p=0.02$) : similairement aux réserves fusionnelles en convergence, plus la réserve accommodative était importante, plus la performance au temps d'interférence était courte.

En appliquant une correction de Bonferroni concernant les tests relatifs à la réponse accommodative en vision de près (Rock accommodatif monoculaire et binoculaire, PPA mono, PPA bino, ARN et ARP), les valeurs de p se devaient d'être inférieures à 0.01 pour rester significatives. En l'état, la corrélation entre les résultats des réserves accommodatives testées monoculairement (PPA mono) et de l'effet d'interférence (EI) est restée significative (voir Fig. 4). Ces résultats suggèrent ici encore que plus les capacités accommodatives des sujets sont élevées, meilleure sera la performance d'inhibition testée par le test de Stroop.

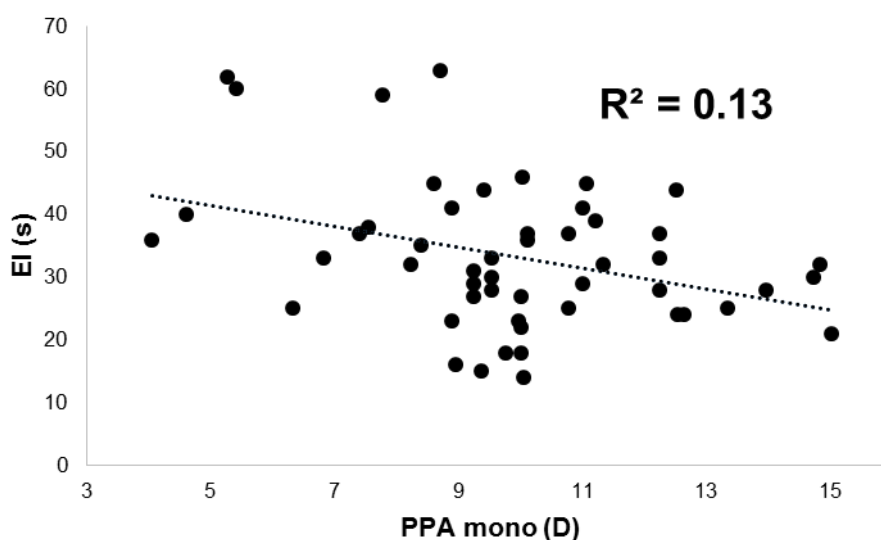


Fig. 4 : Régression linéaire de l'effet d'interférence (EI, secondes) en fonction des réserves accommodatives (en dioptries). Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson est indiqué sur le graphique (R^2) ainsi que la droite de tendance (en pointillés).

Résultats de lecture et d'interférence de Stroop chez les sujets présentant ou non une disparité de fixation lors de l'examen clinique.

Afin d'apprécier l'incidence potentielle d'une disparité de fixation relevée avec le test de Mallett en vision de près, nous avons divisé l'échantillon en deux groupes distincts : le premier regroupant les sujets n'en présentant pas ($N=44$), le second composé des sujets en présentant ($N=7$, 4 d'entre eux présentant une exo-disparité et 3 d'entre eux une éso-disparité). Le test non-paramétrique de Mann-Whitney n'a montré aucune différence

significative entre les résultats des deux groupes en termes de vitesse de lecture mesurée pendant le test de L'Alouette (valeurs moyennes 149.6 mots/min. ± 26.5 contre 154.4 mots/min. ± 51.1 ; $U=146.0$, $p=0.83$), de vitesse de lecture mesurée pendant l'épreuve de lecture du test de Stroop (valeurs moyennes 146.1 mots/min. ± 19.5 contre 153.1 mots/min. ± 44.9 ; $U=153.5$, $p=0.98$), ou d'effet d'interférence pour le test de Stroop (valeurs moyennes 32.2s ± 10.3 contre 40.1s ± 16.6 ; $U=103.5$, $p=0.17$). Aucune différence significative ($p>0.05$) n'a été retrouvée concernant les résultats de ces mêmes tests entre les personnes présentant une exo-disparité et les personnes présentant une eso-disparité, bien que l'échantillon soit très restreint.

Résultats de lecture et d'interférence de Stroop et lien avec le critère de Percival

Comme développé dans la méthodologie générale, Percival a proposé un critère de diagnostic supplémentaire en lien avec l'amplitude des réserves fusionnelles pour caractériser le confort visuel. Pour le respecter, le point de demande du sujet doit se trouver dans le tiers milieu de ses réserves totales en convergence et divergence associées (VSN), ce qui témoigne d'un bon équilibre des réserves entre-elles (Sheedy et Saladin, 1978). Afin d'apprécier si le respect de ce critère en vision de près pouvait avoir une incidence sur les aptitudes en lecture ou lors du test de Stroop, nous avons divisé notre échantillon en deux groupes distincts : le premier composé des sujets respectant le critère ($N=38$) et le second regroupant les sujets ne respectant pas ce critère ($N=13$). Le test non-paramétrique de Mann-Whitney n'a montré aucune différence significative entre les résultats des deux groupes en termes de vitesse de lecture mesurée pendant le test de L'Alouette (valeurs moyennes 145.7 mots/min. ± 29.0 contre 163.8 mots/min. ± 31.2 ; $U=172.5$, $p=0.11$), de vitesse de lecture mesurée pendant l'épreuve de lecture du test de Stroop (valeurs moyennes 143.5 mots/min. ± 20.6 contre 157.3 mots/min. ± 30.6 ; $U=187.5$, $p=0.19$), ou d'effet d'interférence pour le test de Stroop (valeurs moyennes 32.36s ± 10.37 contre 35.92s ± 14.45 ; $U=211.5$, $p=0.44$).

Résultats de lecture et d'interférence de Stroop et lien avec le critère de Sheard

Comme développé dans la méthodologie générale, Sheard (1930) a proposé un autre critère de diagnostic concernant les réserves fusionnelles, mais prenant en compte la valeur de la phorie cette fois. Afin d'apprécier si le respect de ce critère en vision de près pouvait avoir une incidence sur les aptitudes en lecture ou lors du test de Stroop, nous avons divisé notre échantillon en deux groupes distincts : le premier composé des sujets respectant le critère ($N=37$) et le second regroupant les sujets ne respectant pas ce critère ($N=14$, avec 9 sujets

exophores et 5 sujets ésophores). Le test non-paramétrique de Mann-Whitney n'a montré aucune différence significative entre les résultats des deux groupes en termes de vitesse de lecture mesurée pendant le test de L'Alouette (valeurs moyennes 149.7 mots/min. \pm 31.4 vs 151.9 mots/min. \pm 28.6; $U=237.5$, $p=0.65$), de vitesse de lecture mesurée pendant l'épreuve de lecture du test de Stroop (valeurs moyennes 146.6 mots/min. \pm 23.2 vs 148.2 mots/min. \pm 26.7, $U=242.0$, $p=0.72$). Cette fois cependant, une différence significative a été retrouvée entre les deux groupes concernant l'effet d'interférence pour le test de Stroop (valeurs moyennes 30.27s \pm 9.83 vs 41.21s \pm 12.14, $U=116.0$, $p<0.01$), témoignant ici d'une performance moins bonne pour les sujets qui ne respectaient pas ce critère de confort comparés à ceux qui le respectaient (voir fig. 5).

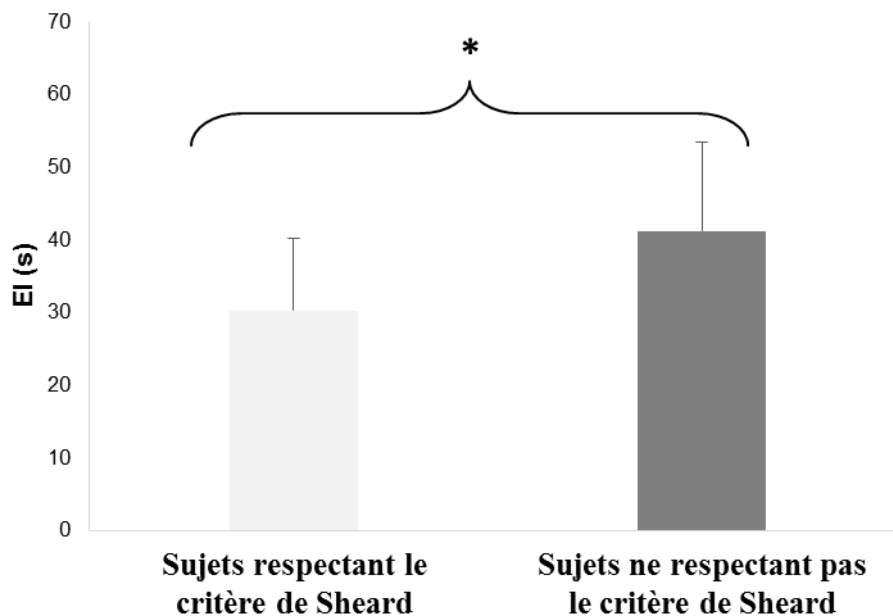


Fig.5 : Valeurs moyennes et écart-types des résultats d'effet d'interférence au test de Stroop (EI, en secondes) pour le groupe de sujets respectant le critère de confort de Sheard en vision de près (N=37) et pour le groupe de sujets ne le respectant pas (N=14).

Comparaisons des résultats entre sujets asymptomatiques et sujets symptomatiques présentant des dysfonctionnements de vergence et d'accommodation

Nous avons préalablement utilisé la classification de Scheiman et Wick (2014) pour scinder notre échantillon entre sujets normaux et sujets présentant d'éventuels dysfonctionnements (voir Table 1), en nous reportant aux mêmes critères chiffrés que dans les études de Porcar et Martinez-Palomera (1997) et Shin et al. (2009). Afin d'affiner notre analyse sur l'incidence de ces dysfonctionnements sur les performances en lecture ou lors du test de Stroop, nous avons décidé d'utiliser les résultats du CISS pour faire la distinction entre sujets asymptomatiques et sujets symptomatiques. Nous avons choisi, comme précédemment et en lien avec la littérature (Rouse et al., 2009), un seuil limite de 16 en termes de score pour ce faire.

Ainsi, 3 groupes suffisamment importants en nombre se sont détachés de la classification :

- un groupe Contrôle (N=18), composé de sujets ne présentant aucun dysfonctionnement de la vergence et/ou de l'accommodation et rapportant un score inférieur à 16 sur l'échelle CISS.
- un groupe de sujets symptomatiques présentant une insuffisance de convergence (groupe SIC, N=11), rapportant un score supérieur ou égal à 16 sur l'échelle CISS.
- un groupe de sujets symptomatiques présentant un excès accommodatif (groupe SEA, N=7), rapportant un score supérieur ou égal à 16 sur l'échelle CISS.

Corrélations dans chaque groupe

De façon similaire aux régressions linéaires étudiées sur l'échantillon entier, nous nous sommes attardés sur les corrélations possibles entre résultats optométriques (variables indépendantes) et performances en lecture ou lors du test de Stroop (variables dépendantes) à l'intérieur de chacun des groupes cités précédemment. Les Tables 4, 5 et 6 exposent les résultats respectifs des groupes Contrôle, SIC et SEA. Les corrélations significatives sont indiquées en gras et par un astérisque.

Test réalisé	Groupe Controle		Coefficients de corrélation de Bravais Pearson (r ²)				
	Moyenne	Ecart-type	Vitesse lecture Alouette	Score d'erreur Alouette	Vitesse lecture Stroop	Score d'erreur Lecture Stroop	EI Stroop
Score CISS	10.39	4.33	0.19	0.02	0.23*	0.06	0.18
PPC (cm)	7.33	2.91	0.01	0.03	<0.01	0.17	<0.01
Phorie VL (Δ)	1.16	4.03	0.07	0.17	0.03	0.02	0.04
VSN VL (Δ)	23.33	7.77	0.01	<0.01	0.01	0.33*	0.01
RFN VL (Δ)	11.83	5.79	0.05	0.06	<0.01	0.08	<0.01
RFP VL (Δ)	11.5	5.02	0.01	0.05	0.01	0.33*	0.07
Phorie VP (Δ)	-0.5	3.15	0.08	0.06	<0.01	0.02	<0.01
VSN VP (Δ)	39.22	9.97	0.22*	0.12	0.11	<0.01	0.17
RFN VP (Δ)	15.67	5.16	0.33*	0.09	0.06	<0.01	0.06
RFP VP (Δ)	23.56	6.75	0.06	0.08	0.09	<0.01	0.17
ARN (D)	1.93	0.36	0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.02
ARP (D)	2.54	1.33	0.24*	0.18	0.18	0.01	0.05
PPA Mono. (D)	11.09	2.76	0.02	0.13	0.15	0.15	0.11
PPA Bino. (D)	12.96	2.69	0.02	0.18	0.21	0.12	0.14
Rock accommodatif mono. (c./min)	11.28	6.09	<0.01	<0.01	0.01	0.04	0.05
Rock accommodatif bino. (c./min)	9.44	4.86	<0.01	0.08	0.02	0.05	0.05
Rock prismatique (c./min)	10.33	3.85	0.05	0.05	0.03	0.16	0.05

Table 4 : Moyennes et écarts-types des résultats des tests optométriques, et résultats des corrélations de Bravais-Pearson entre mesure cliniques et performance de lecture et au test de Stroop pour le groupe Contrôle. Les corrélations significatives sont indiquées en caractère gras et par un astérisque (p<0.05, *).

Test réalisé	Groupe SIC		Coefficients de corrélation de Bravais Pearson (r ²)				
	Moyenne	Ecart-type	Vitesse lecture Alouette	Score d'erreur Alouette	Vitesse lecture Stroop	Score d'erreur Lecture Stroop	EI Stroop
Score CISS	23.55	8	0.29	0.02	0.31	0.03	0.43*
PPC (cm)	11.36	3.04	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01
Phorie VL (Δ)	-1.77	2.16	0.13	0.29	0.25	0.22	0.52*
VSN VL (Δ)	19	5.48	0.15	0.02	0.07	0.12	0.02
RFN VL (Δ)	8.68	3.7	0.47*	0.41*	0.59*	0.34	0.53*
RFP VL (Δ)	10.32	4.47	0.01	0.14	0.09	<0.01	0.17
Phorie VP (Δ)	-8.45	3.3	0.05	0.36	0.09	0.13	0.11
VSN VP (Δ)	27.81	6.48	0.05	<0.01	<0.01	0.31	0.02
RFN VP (Δ)	7.09	3.76	0.48*	0.37*	0.48*	0.1	0.24
RFP VP (Δ)	20.73	6.76	0.03	0.16	0.11	<0.01	0.16
ARN (D)	1.59	0.55	0.17	0.13	0.15	0.08	0.21
ARP (D)	3.34	1.69	<0.01	0.05	0.01	0.05	0.01
PPA Mono. (D)	8.56	2.2	0.09	0.02	0.09	0.06	0.11
PPA Bino. (D)	10.28	2.99	<0.01	0.08	0.01	0.01	0.03
Rock accommodatif mono. (c./min)	5.91	4.98	0.08	0.09	0.05	0.17	0.13
Rock accommodatif bino. (c./min)	4.86	4.38	0.01	0.09	0.02	0.05	0.13
Rock prismatique (c./min)	6.86	4.48	<0.01	0.04	<0.01	0.19	0.02

Table 5 : Moyennes et écarts-types des résultats des tests optométriques, et résultats des corrélations de Bravais-Pearson entre mesure cliniques et performance de lecture et au test de Stroop pour le groupe présentant une Insuffisance de Convergence Symptomatique (SIC). Les corrélations significatives sont indiquées en caractère gras et par un astérisque (p<0.05, *).

Test réalisé	Groupe SEA		Coefficients de corrélation de Bravais Pearson (r ²)				
	Moyenne	Ecart-type	Vitesse lecture Alouette	Score d'erreur Alouette	Vitesse lecture Stroop	Score d'erreur Lecture Stroop	EI Stroop
Score CISS	26.43	16.28	0.24	0.41	0.09	0.16	0.21
PPC (cm)	6.0	2.08	0.26	0.56	0.22	0.18	0.24
Phorie VL (Δ)	-0.79	2.12	0.04	0.43	0.09	0.06	0.62*
VSN VL (Δ)	21	5.39	<0.01	0.02	0.26	0.11	0.02
RFN VL (Δ)	8.93	1.37	0.22	0.55	0.17	0.12	0.02
RFP VL (Δ)	12.07	4.90	0.03	<0.01	0.45	0.20	0.01
Phorie VP (Δ)	-3.14	3.19	<0.01	0.22	0.16	<0.01	0.25
VSN VP (Δ)	34.71	5.77	0.15	0.01	0.23	<0.01	0.19
RFN VP (Δ)	10.71	5.16	0.47	0.31	0.33	0.08	0.05
RFP VP (Δ)	24.00	3.23	0.16	0.49	<0.01	0.17	0.19
ARN (D)	1.64	0.32	0.14	0.02	<0.01	0.02	0.56
ARP (D)	2.29	1.05	0.03	<0.01	0.02	0.52	0.06
PPA Mono. (D)	10.74	1.22	0.39	0.52	0.05	0.07	0.08
PPA Bino. (D)	13.41	1.54	0.03	0.09	0.13	0.43	0.09
Rock accommodatif mono. (c./min)	2.82	1.87	0.16	0.02	0.06	0.29	0.64*
Rock accommodatif bino. (c./min)	3.5	3.36	0.21	0.02	<0.01	0.15	0.02
Rock prismatique (c./min)	8.5	4.29	0.04	0.03	0.39	0.44	0.06

Table 6 : Moyennes et écarts-types des résultats des tests optométriques, et résultats des corrélations de Bravais-Pearson entre mesure clinique et performance de lecture et au test de Stroop pour le groupe présentant un Excès Accommodatif Symptomatique (SEA). Les corrélations significatives sont indiquées en caractère gras et par un astérisque (p<0.05, *).

Score CISS

La régression linéaire montre une corrélation moyenne et significative entre le score CISS et la vitesse lors de l'épreuve de lecture du test de Stroop ($R^2 = 0.23$, $p < 0.05$) dans le groupe Contrôle : plus la symptomatologie était élevée, plus la vitesse était lente. Cependant, aucune corrélation de ce type n'a été retrouvée entre le score CISS et la vitesse de lecture pendant le test de L'Alouette. Ce résultat n'est donc ici encore pas confirmé dans les deux épreuves.

La régression linéaire montre une corrélation moyenne et significative entre le score CISS et l'effet d'interférence pendant le test de Stroop ($R^2 = 0.43$, $p < 0.03$) dans le groupe SIC : plus la symptomatologie était importante, plus la performance était mauvaise car plus l'effet d'interférence était long.

Résultats concernant les mesures d'accommodation et de vergence

En appliquant une correction de Bonferroni concernant les tests relatifs à la réponse de vergence en vision de près (PPC, RFN, RFP, Phorie VP, Rapport AC/A calculé, Rock accommodatif binoculaire et Rock prismatique) d'une part, et concernant les tests relatifs à la réponse accommodative en vision de près (Rock accommodatif monoculaire et binoculaire, PPA mono, PPA bino, ARN et ARP) d'autre part, les valeurs de p se devaient d'être inférieures à 0.007 concernant la fonction de vergence et inférieures à 0.01 concernant la fonction accommodative pour rester significatives.

Ainsi, seule une corrélation, entre les réserves fusionnelles en divergence en vision de loin (RFN VL) et la vitesse de lecture pendant l'épreuve de lecture du test de Stroop dans le groupe SIC est restée significative ($R^2 = 0.59$, $p = 0.005$) : plus les réserves étaient importantes, plus lente était la vitesse de lecture, ce qui est assez peu en cohérence avec les résultats trouvés précédemment. Il n'y a cependant pas eu de corrélation significative entre les réserves fusionnelles en divergence en vision de loin et la vitesse de lecture lors du test de L'Alouette dans ce même groupe (SIC), ce qui confirme la difficulté à interpréter cette corrélation.

Comparaisons entre les groupes Contrôle, SIC et SEA

Afin d'affiner notre analyse, nous avons décidé d'observer les différences entre les moyennes des résultats aux différents tests, qu'ils soient expérimentaux ou optométriques, entre les groupes ainsi composés. Si la symptomatologie semblait être un problème pouvant impacter certains résultats, nous souhaitions savoir si dans leur ensemble, les performances de chaque groupe étaient similaires ou si au contraire, nous retrouvions des différences en lien avec les corrélations faites précédemment sur l'ensemble de l'échantillon comme à l'intérieur de chaque groupe. Nous avons donc d'abord utilisé une ANOVA non-paramétrique de Kruskal-Wallis. Conformément à ce qui était attendu, nous avons retrouvé plusieurs différences significatives concernant certains résultats de test optométriques : score CISS, PPC, Phorie VL, Phorie VP, réserves fusionnelles en vision de près (RFN VP et VSN VP), rock accommodatif monoculaire et binoculaire, comme le montre la Table 7.

Tests	Groupe Controle		Groupe SIC		Groupe SEA		Resultats de l'anova de Kruskal-Wallis	
	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	H (2, N=36)	Valeur de p
Score CISS	10.39	4.33	23.55	8	26.43	16.28	26.51	<0.01*
PPC (cm)	7.33	2.91	11.36	3.04	6.0	2.08	13.58	<0.01*
Phorie VL (Δ)	1.16	4.03	-1.77	2.16	-0.79	2.12	6.32	0.04*
VSN VL (Δ)	23.33	7.77	19	5.48	21	5.39	2.23	0.33
RFN VL (Δ)	11.83	5.79	8.68	3.7	8.93	1.37	3.96	0.14
RFP VL (Δ)	11.5	5.02	10.32	4.47	12.07	4.90	0.62	0.73
Phorie VP (Δ)	-0.5	3.15	-8.45	3.3	-3.14	3.19	20.82	<0.01*
VSN VP (Δ)	39.22	9.97	27.81	6.48	34.71	5.77	10.77	<0.01*
RFN VP (Δ)	15.67	5.16	7.09	3.76	10.71	5.16	15.26	<0.01*
RFP VP (PD)	23.56	6.75	20.73	6.76	24.00	3.23	2.66	0.26
ARN (D)	1.93	0.36	1.59	0.55	1.64	0.32	4.38	0.11
ARP (D)	2.54	1.33	3.34	1.69	2.29	1.05	2.24	0.33
PPA Mono (D)	11.09	2.76	8.56	2.2	10.74	1.22	7.48	0.02*
PPA Bino (D)	12.96	2.69	10.28	2.99	13.41	1.54	6.61	0.04*
Rock Acc. Mono	11.28	6.09	5.91	4.98	2.82	1.87	12.50	<0.01*
Rock Acc. Bino	9.44	4.86	4.86	4.38	3.5	3.36	9.98	<0.01*
Rock prismatique	10.33	3.85	6.86	4.48	8.5	4.29	3.06	0.22
Vitesse de lecture alouette	141.52	24.45	149.37	27.60	151.48	40.79	1.82	0.40
Score d'erreur alouette	12.22	9.01	9.64	5.43	16.14	8.05	3.21	0.20
Vitesse de lecture stroop	142.59	22.52	141.83	19.67	143.62	19.38	0.07	0.97
Score d'erreur lecture stroop	0.22	0.43	0.27	0.65	0.14	0.38	0.19	0.91
EI Stroop	29.11	10.48	41.91	10.89	32	10.85	10.18	<0.01*

Table 7 : Moyennes et écarts-types de chaque groupe concernant les test optométriques, le test de l'Alouette et le test de Stroop. Les résultats significatifs de l'ANOVA de Kruskal-Walis sont indiqués en gras et par un astérisque (*).

Pour chaque différence significative trouvée avec l'ANOVA de Kruskal-Wallis, nous avons comparé les résultats des groupes deux à deux à l'aide du test non-paramétrique de Mann-Whitney, comme le montre la Table 8. Par la suite, nous présenterons les résultats concernant les épreuves de lecture et du test de Stroop.

Test	comparaison des Groupes	Résultats au test de Mann-Whitney	Valeur de p
Score CISS	SIC vs Contrôle	U=0.00	<0.01*
	SIC vs SEA	U=30.0	0.44
	SEA vs Contrôle	U=0.00	<0.01*
PPC	SIC vs Contrôle	U=30.5	<0.01*
	SIC vs SEA	U=4.00	<0.01*
	SEA vs Contrôle	U=46.5	0.32
Phorie VL	SIC vs Contrôle	U=45.0	0.02*
	SIC vs SEA	U=30.5	0.47
	SEA vs Contrôle	U=41.5	0.19
Phorie VP	SIC vs Contrôle	U=4.5	<0.01*
	SIC vs SEA	U=6.0	<0.01*
	SEA vs Contrôle	U=35.5	0.09
VSN VP	SIC vs Contrôle	U=31.0	<0.01*
	SIC vs SEA	U=14.5	0.03*
	SEA vs Contrôle	U=44.0	0.25
RFN VP	SIC vs Contrôle	U=16.5	<0.01*
	SIC vs SEA	U=18.0	0.06
	SEA vs Contrôle	U=32.5	0.06
PPA mono	SIC vs Contrôle	U=43.5	0.01*
	SIC vs SEA	U=15	0.03*
	SEA vs Contrôle	U=53.5	0.57
Rock acc. mono	SIC vs Contrôle	U=48.5	0.02*
	SIC vs SEA	U=26.0	0.26
	SEA vs Contrôle	U=8.5	<0.01*
Rock acc. bino	SIC vs Contrôle	U=47.0	0.02*
	SIC vs SEA	U=36.5	0.86
	SEA vs Contrôle	U=16.5	<0.01*
EI Stroop	SIC vs Contrôle	U=23.5	<0.01*
	SIC vs SEA	U=23.5	0.17
	SEA vs Contrôle	U=56.5	0.69

Table 8 : Résultats du test de Mann-Whitney dans la comparaison des groupes deux à deux en lien avec les résultats de l'ANOVA de Kruskal-Wallis. Les différences significatives sont indiquées en gras et par un astérisque (*).

Epreuves de lecture :

L'ANOVA non paramétrique de Kruskal-Wallis n'a révélé aucune différence significative entre les groupes concernant :

- La vitesse de lecture pendant l'épreuve de L'Alouette ($H(2) = 1.82, p=0.40$)
- La vitesse de lecture pendant l'épreuve de lecture du test de Stroop ($H(2) = 0.07, p=0.97$)
- Les scores d'erreurs pendant l'épreuve de L'Alouette ($H(2) = 3.21, p=0.20$)

- Les scores d'erreurs pendant l'épreuve de lecture du test de Stroop ($H(2) = 0.19, p=0.91$)

Effet d'interférence (EI) du test de Stroop

L'ANOVA non paramétrique de Kruskal-Wallis a révélé une différence significative entre les groupes en termes de résultats d'effet d'interférence pendant le test de Stroop ($H(2) = 10.18, p<0.01$). Le test non-paramétrique de Mann-Whitney a révélé par la suite une différence significative concernant ce même résultat entre le groupe Contrôle et le groupe SIC ($U = 23.5, p<0.01$). Cependant, aucune différence significative n'a été retrouvée entre les groupes SIC et SEA ($U = 23.5, p=0.17$) et les groupes Contrôle et SEA ($U = 56.5, p=0.69$, voir Fig. 6).

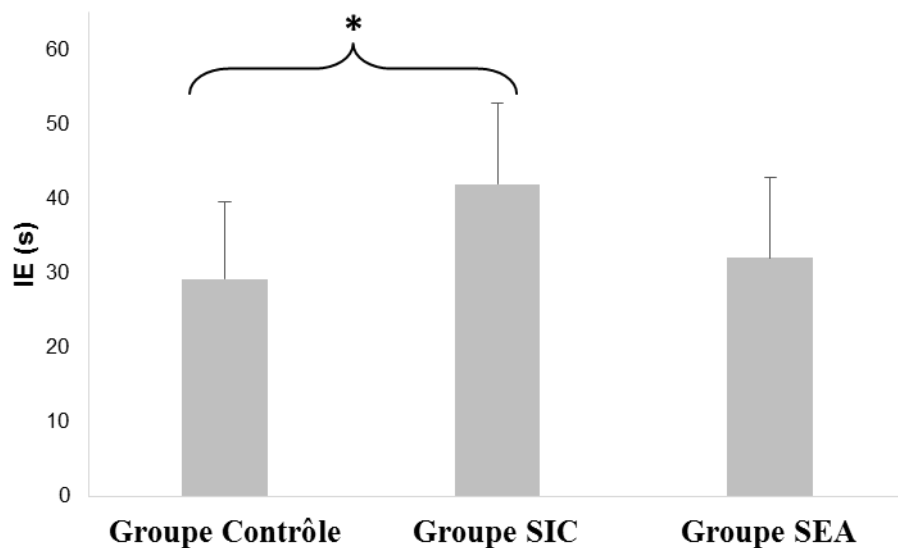


Fig. 6 : Moyennes et écart-types des groupes Contrôle, Insuffisance de convergence symptomatique (SIC) et Excès accommodatif symptomatique (SEA) concernant les résultats d'effet d'interférence (EI) pendant les épreuves du test de Stroop.

Discussion

Le principal résultat de cette étude est la corrélation entre l'amplitude des réserves en convergence et l'effet d'interférence mesuré avec le test de Stroop : plus celle-ci est importante, plus l'effet d'interférence est court, témoignant d'une plus grande facilité à accomplir la tâche d'interférence en comparaison de la tâche de dénomination, donc à utiliser sa capacité d'inhibition et mobiliser ses ressources attentionnelles, entre autres. Des corrélations similaires ont aussi été retrouvées avec d'autres résultats de tests cliniques : une corrélation entre l'amplitude totale des réserves fusionnelles (convergence et divergence réunies) et le score d'effet d'interférence, ainsi qu'entre les réserves totales d'accommodation (PPA) mesurées monoculairement et ce même score d'effet interférence, montrent toutes deux des résultats semblables : moins les réserves en vergence ou en accommodation sont étendues, plus l'effet d'interférence est long. Une corrélation positive est donc retrouvée ici entre l'amplitude des réserves en vergence/accommodation et la performance des fonctions exécutives cognitives évaluée avec le test de Stroop. Les capacités de lecture paraissent cependant beaucoup moins affectées par l'amplitude de ces réponses : ni la vitesse de lecture, ni le score d'erreur ne présente de corrélation significative avec les résultats de ces tests cliniques.

Cette relation entre effet d'interférence et amplitude maximale de la réponse en vergence/accommodation est par la suite confirmée par la comparaison entre 3 groupes de l'échantillon : le premier regroupant les sujets asymptomatiques et sans dysfonctionnement (Contrôle), le second regroupant les sujets symptomatiques et présentant une insuffisance de convergence (SIC), le troisième regroupant les sujets symptomatiques et présentant un excès accommodatif (SEA), selon la classification de Scheiman et Wick (2014). Le groupe Contrôle montre en effet des résultats statistiquement meilleurs concernant l'effet d'interférence comparé au groupe SIC.

Vergence et effet d'interférence : une hypothèse sensorielle

Les réserves fusionnelles ont été précisément mesurées ici à l'aide de prismes rotatifs qui créaient une disparité binoculaire. La réponse de vergence entraînée pour maintenir la vision simple est ici directement déterminée par la détection de cette disparité binoculaire, et implique l'activation de nombreuses aires corticales différentes (cortex visuel V1, cortex pariétal et frontal ; Mays, 1984 ; Judge et Cumming, 1986 ; Leigh et Zee, 2016). En parallèle, les aires corticales associées au contrôle cognitif peuvent être présentées en 2 parties (Milham et al., 2003 ; Aron, 2007 ; Wang et al., 2010). La première concerne les structures frontales,

incluant le cortex préfrontal dorso-latéral (DLPFC), responsable de l'intégration des informations provenant d'autres structures cérébrales et initiant la réponse à apporter en se basant sur la tâche demandée, et le cortex cingulaire antérieur (ACC), responsable de la gestion des informations conflictuelles (Miller et Cohen, 2001 ; Brass et al., 2005 ; Botvinick et al., 2004). La deuxième concerne le réseau impliqué de l'organisation de la réponse, qui inclut le cortex pariétal postérieur (PPC), responsable de la modulation de l'orientation attentionnelle (Coulthard et al., 2008), ainsi que les aires motrices et pré-motrices supplémentaires (SMA et pre-SMA), jouant un rôle dans la sélection et l'exécution des réponses (Nachev et al., 2008 ; Banich et al., 2000). Certaines de ces aires sont très sollicitées pendant la tâche cognitive d'inhibition telle qu'elle est évaluée pendant le test de Stroop : le cortex pré-frontal dorso-latéral (DLPFC), le cortex cingulaire antérieur (ACC) et le cortex pariétal postérieur (PPC, Banich et al., 2000, 2001 et 2002 ; Barch et al., 2001). La corrélation retrouvée entre les réserves en vergence et les performances au test de Stroop pourrait être attribuée au fait que les aires corticales citées sont hautement sollicitées dans ces deux tâches (contrôle de la vergence et inhibition), qui requièrent de plus un déploiement attentionnel correct. Il est important cependant de noter que notre version du test de Stroop n'était que de courte durée (100 stimuli) et que nos sujets ne présentaient que des dysfonctionnements mineurs de l'accommodation et/ou de la vergence. En présence d'une version plus longue du test et/ou de dysfonctionnements plus sévères, nous anticipons de retrouver de plus fortes corrélations.

Déploiement attentionnel et vergence : une hypothèse complémentaire.

Basée sur la théorie pré-motrice de l'attention (Rizzolatti et al., 1987), le déplacement de l'attention visuelle d'un objet à un autre est un sous-produit de la préparation d'un mouvement de saccade vers le nouveau centre d'intérêt. Au regard de nos résultats, cette théorie pourrait donc être élargie pour inclure les mouvements de vergence étant donné leur importance pour maintenir une perception simple des objets. Si le sujet présente un mauvais contrôle de ses mouvements de vergence, il en résulte très régulièrement des disparités de fixation et les axes visuels ne se croisent pas à la distance appropriée. Un dysfonctionnement de la vergence va de ce fait provoquer une mauvaise base pour la focalisation de l'attention, interférant avec le déploiement des fonctions exécutives cognitives. La différence avec la théorie pré-motrice de l'attention présentée précédemment est qu'ici, la tâche d'interférence de Stroop représente un niveau avancé de déploiement attentionnel, qui est le prérequis du traitement de l'information visuelle et de la cognition qui en découle. Cette hypothèse appelle

à des recherches plus approfondies et utilisant des mesures objectives des angles de vergence, de la coordination des saccades et de la réponse accommodative pendant la tâche de Stroop.

Corrélation entre les réserves accommodatives et l'effet d'interférence.

La mesure du Punctum Proximum d'Accommodation (PPA) monoculaire représente en réalité le point le plus proche que le sujet puisse encore voir nettement en utilisant le maximum de ses réserves accommodatives. Contrairement au test clinique des réserves fusionnelles, où des prismes sont utilisés pour créer une disparité binoculaire et entraîner une réponse de vergence tout en maintenant la réponse accommodative stable, la mesure du PPA est réalisée en espace réel. La part de vergence dans la réponse accommodative pendant la mesure monoculaire est alors diminuée par la dissociation. Malgré cela, une corrélation similaire à celle retrouvée avec les réserves fusionnelles est retrouvée entre les réserves accommodatives et l'effet d'interférence, indiquant que plus celles-ci étaient importantes, plus l'effet d'interférence était court. Cette corrélation confirme donc les résultats trouvés précédemment et montre que la vergence et l'accommodation sont toutes deux liées aux fonctions exécutives telles qu'elles sont évaluées avec le test de Stroop.

Symptomatologie

Les corrélations significatives entre le score CISS et l'effet d'interférence, dans l'échantillon entier comme dans le groupe SCI, ainsi que la différence significative retrouvée entre les sujets asymptomatiques et symptomatiques concernant l'EI dans l'ensemble de l'échantillon, suggèrent que le score de symptomatologie rapporté par l'échelle CISS peut s'avérer être un bon indicateur concernant les résultats en termes de fonctions exécutives : le nombre et la fréquence des symptômes sont négativement corrélés à la performance à l'interférence de Stroop. Cela représente un intérêt clinique supplémentaire, spécialement chez les jeunes étudiants, révélant qu'un désordre visuel symptomatique en vision de près devrait être pris en charge, étant donné l'impact qu'il peut avoir sur les capacités d'inhibition mesurées avec le test de Stroop. En effet, ce résultat est aussi en lien avec l'attention, la mémorisation et la compréhension en lecture, même si ici les capacités pendant les tâches de lecture automatique peuvent paraître dans les moyennes. Cependant, utiliser une autre échelle d'évaluation des symptômes plus générale, comme le COVID-QOL (Maples, 2002), aurait aussi pu être intéressant pour étudier ces comparaisons.

La relation avec les dysfonctionnements de la vergence

A notre connaissance, cette présente étude montre pour la première fois une performance diminuée concernant les fonctions exécutives mesurée par le test de Stroop chez les sujets présentant une insuffisance de convergence symptomatique (SIC), comparée aux sujets présentant une vision binoculaire sans dysfonctionnement (groupe Contrôle). De façon intéressante, aucune différence significative n'a cependant été retrouvée entre ce même groupe Contrôle et les sujets présentant un excès accommodatif symptomatique (SEA) en termes de résultats d'interférence. Le score de symptomatologie CISS était donc un bon indicateur, cependant les résultats montrent que l'insuffisance de convergence tend à avoir une plus grande incidence sur les performances au test de Stroop qu'un désordre comme l'excès accommodatif. Le résultat présente encore un intérêt clinique et ouvre les frontières entre la pratique clinique de l'optométrie, de l'orthoptie, de l'ophtalmologie et de la neuropsychologie. Premièrement, il montre l'importance de la prise en charge des désordres de la vergence en termes de rééducation et d'ergonomie dans le but de maintenir les performances des fonctions cognitives à un niveau optimal. Deuxièmement, le test de Stroop est aussi utilisé dans le dépistage de la dyslexie et des désordres d'hyperactivité ou de déficit attentionnel. Nous suggérons donc que les fonctions de vergence et d'accommodation soient évaluées systématiquement au préalable, étant donné leur incidence potentielle sur la qualité du traitement de l'information visuelle et du déploiement attentionnel, interférant de ce fait avec les fonctions exécutives cognitives.

Pourquoi la lecture n'est-elle pas affectée ?

Seules de moyennes corrélations ont été retrouvées entre résultats optométriques et capacités en lecture (vitesse et score d'erreur) pendant les tâches concernées (épreuves de lecture de Stroop et de L'Alouette), cependant ces résultats n'étaient pas confirmés sur l'échantillon entier. De surcroît, les corrélations significatives entre vitesse de lecture et résultats optométriques ne concernaient qu'un des deux tests et jamais les deux à la fois, tout comme les scores d'erreur. Enfin, les comparaisons entre les 3 groupes majeurs de l'échantillon n'ont montré aucune différence significative en termes de vitesse ou de score d'erreur. Il est cependant à noter qu'ici, c'est bien la lecture automatique qui a été testée, et non la compréhension ou la mémorisation : pendant le test de L'Alouette ou de l'épreuve de lecture de Stroop, aucun de ces deux critères n'était évalué. De ce fait, ces deux épreuves sont d'un degré de demande cognitif moins élevé que ne l'est celui de l'interférence de Stroop. En conséquence, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'un désordre de la vergence peut entraîner

des problèmes lorsque la demande cognitive liée à la tâche est plus importante que pour la simple lecture automatique.

Tests cliniques et utilité du critère de Sheard

Au long de notre évaluation clinique, nous avons utilisé une vingtaine de tests différents pour mesurer les capacités d'accommodation et de vergence, ainsi que leur synergie. Cependant, les résultats indiquent que seuls quelques-uns paraissent très importants pour leur lien avec les fonctions exécutives cognitives : les réserves fusionnelles, les réserves accommodatives (PPA), le Punctum Proximum de Convergence (PPC) et les mesures des phories. Ces tests sont essentiels au dépistage des dysfonctionnements basiques et montrent la qualité de la réponse en convergence, en divergence et en accommodation. De surcroît, le critère de Sheard en vision binoculaire paraît être, lui aussi, un bon indicateur concernant les résultats d'interférence du test de Stroop. Cette mesure physiologique, calculée en liant la phorie et l'amplitude des réserves fusionnelles et reflétant le confort visuel pendant une tâche prolongée, est donc aussi liée aux résultats des fonctions exécutives cognitives. Ce dernier résultat renforce donc le message général de cette étude : la qualité des fonctions de vergence et d'accommodation est liée au fonctionnement exécutif cognitif.

Valorisation : cette étude a été publiée dans le journal scientifique international *Optometry and vision science* en Février 2016 (93:194Y208). L'article original est joint ci-après. Outre son importance théorique, l'étude a une importance clinique. Le bilan clinique appliqué initialement a été très exhaustif avec de nombreux tests. L'étude permet de cerner un sous-groupe de tests le plus utile pour évaluer les fonctions visuo-motrices en lien avec la cognition. Ces résultats ont été présentés lors du congrès scientifique de la SILMO Academy (2014).

ETUDE 2

Impact d'un conflit A-V induit sur les saccades en lecture et la cognition

Introduction

De nombreux facteurs sont susceptibles d'influencer les performances scolaires. De récentes études cliniques suggèrent cependant que les dysfonctionnements A-V auraient un impact négatif conséquent sur différents aspects de la réussite académique (Borsting et al. 2003, Shin et al. 2009, Hoffman 1980, Vaughn et al. 2006) chez les enfants. En effet, les résultats de ces études amènent à s'interroger sur les interactions possibles entre qualité des fonctions de vergence/accommodation et processus cognitifs impliqués dans l'apprentissage. Cependant, ces interactions s'avèrent hypothétiques et appellent à un approfondissement. En effet, il est possible d'interpréter les difficultés de concentration et d'attention comme la résultante des symptômes visuels engendrés par un dysfonctionnement A-V (Sheedy et al. 1978, Ciuffreda 2002), et que ceux-ci seraient donc indirectement à l'origine de performances scolaires diminuées dans certains domaines (Borsting et al. 2003, Maples 2003, Vaughn et al. 2006, Garzia 1994, Castanes 2003).

Les fonctions exécutives cognitives, comme la planification, la flexibilité ou la prise de décision (Miyake et al., 2000), représentent des processus de haut niveau responsables du contrôle cognitif du comportement et sont réputées pour être aussi en lien avec la réussite scolaire, en particulier les fonctions d'inhibition et de mémoire de travail, essentielles pour l'apprentissage et le maintien de l'attention (Redick and Engle, 2006; Fernandes et al., 2016 ; Martinussen and Major, 2011; Haapalaetal, 2014).

Conflit A-V induit

Un nombre beaucoup plus limité d'études s'est focalisé sur l'impact que peut avoir un conflit A-V induit sur les ressources cognitives. Pour provoquer un stress visuel, il est possible de faire varier la demande en convergence à l'aide de prismes ou en accommodation à l'aide de verres sphériques, afin de déstabiliser la synergie habituelle existante entre ces deux composantes. Ces conditions particulières forcent le sujet à corriger de défaut en modifiant sa réponse en vergence sans faire varier son positionnement accommodatif, ou vice-versa, pour conserver une vision simple et nette. Cependant, même si le système visuel est capable de

compenser une importante part de conflit A-V induit, en particulier chez l'adulte (Barawadj et al., 2009), cet effort est susceptible d'entraîner une modification immédiate des processus visuo-moteurs liée à l'adaptation, ainsi d'avoir un impact sur d'autres processus, comme celui de l'attention visuelle. Narayanasami et al. (2014) ont montré que l'induction de verres sphériques d'une puissance de -2.50δ , provoquant de ce fait une hypermétropie induite de 2.5δ , avait eu un impact sur les performances en lien avec l'apprentissage chez des enfants. En effet, les participants ont montré des résultats moins bons et ralentis pendant leurs tests de lecture, leur test de traitement de l'information visuelle et leur test d'oculomotricité en lecture en comparaison de la condition contrôle, et ce immédiatement après l'induction des verres sphériques. De surcroît, les auteurs ont aussi constaté que cette diminution des performances était exacerbée après 20 minutes de travail soutenu, suggérant qu'une demande accommodative plus importante avait un impact négatif sur les processus cognitifs et le contrôle des mouvements oculaires. Ces résultats recourent ceux de Garzia et al. (1989) chez les étudiants, qui avaient testé l'effet d'un conflit induit à l'aide de verres sphériques de -2δ . Ici encore, le temps de lecture était augmenté en comparaison d'une condition contrôle. Poltavski et al. (2012) ont eux aussi retrouvé des performances diminuées chez des adultes lors d'un test psychotechnique faisant appel aux capacités d'attention soutenue après l'induction de verres sphériques de même puissance. Le retard accommodatif mesuré était plus important et le temps de réaction plus long en condition de conflit en comparaison de la condition contrôle. Enfin, Luhdlam et Luhdlam (1988) ont pour leur part utilisé des prismes pour créer un conflit A-V chez des étudiants. Une fois encore, les performances de lecture ont été diminuées dans ces conditions. Tous ces résultats suggèrent donc que l'induction d'un conflit A-V peut à la fois perturber la motricité binoculaire, comme pendant des saccades de lecture, et les processus cognitifs, en particulier concernant les fonctions d'inhibition et la gestion des ressources attentionnelles.

L'inhibition et le test de Stroop

En lien avec notre première étude, nous avons décidé d'approfondir les résultats retrouvés en utilisant de nouveau le test de Stroop (Stroop, 1935; McLeod, 1991). Il nous permet d'observer plus en détail le comportement oculomoteur lors de tâches exigeant différents degrés de cognition (lecture, dénomination et interférence). Les capacités d'inhibition, relevant d'un haut degré cognitif, sont plus particulièrement testées pendant la phase d'interférence, et cette fonction exécutive est en lien direct avec les processus d'attention soutenue. Les études de neuroimagerie ont identifié un réseau cortical actif quand l'inhibition

est stimulée et impliquant différentes régions (préfrontale, pariétale, temporale et cingulaire, Collette et al., 2006). Ces aires particulières sont similaires à celles impliquées dans l'activation du contrôle endogène de l'attention, comme pour le cas du cortex cingulaire antérieur (ACC), du sillon intrapariétal (IPS) et du cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC ; Mansouri et al., 2009 ; Wang et al., 2010 ; Aron, 2011). D'autres études ont montré une activation plus importante du DLPFC, de l'ACC ainsi que du cortex pariétal postérieur (PPC, Chen et al., 2013 ; Pardo et al., 2000 ; Bush et al., 1998) pendant la passation des épreuves d'interférence de Stroop, ce qui confirme les précédentes connexions présentées entre l'inhibition, le contrôle attentionnel et ce test en particulier. Il est important de signaler aussi que le gyrus fusiforme, situé dans l'aire inféro-temporale, est la région corticale majoritairement impliquée cette fois dans l'identification des couleurs (Chao et Martin, 1999) ou des mots pendant la lecture (Cohen et al., 2000).

Plusieurs études comportementales ont enfin montré que les symptômes relatifs au trouble de déficit de l'attention lié à l'hyperactivité (ADHD) étaient corrélés à la performance d'interférence pendant le test de Stroop (Ikeda et al., 2009). D'un point de vue optométrique maintenant, Borsting et al. (2005) ont montré que ces mêmes symptômes étaient plus fréquemment rencontrés chez les enfants présentant un dysfonctionnement de type insuffisance de convergence ou d'accommodation. Additionnellement, l'étude de Wilmer et al. (2009) a aussi fait le lien entre symptomatologie relative à des problèmes d'attention et variation de la phorie après un effort visuel prolongé, montrant une relation entre mauvais processus de vergence/accommodation d'adaptation et symptômes rencontrés. Ces résultats suggèrent la possibilité que le contrôle attentionnel puisse être détérioré lorsque le système visuel rencontre des difficultés à maintenir une vision simple et nette de la cible.

Les mécanismes stimulés par la tâche d'interférence de Stroop partagent aussi des processus communs avec ceux de la lecture. Les différentes études de l'équipe de Protopapas (2007, 2014) ont montré que les enfants bons lecteurs présentaient un effet d'interférence moins important en comparaison des enfants présentant des problèmes de lecture. Les résultats de leur deuxième étude (2014) proposent que l'effet d'interférence puisse être allongé si le processus de lecture automatique n'est pas correctement efficace, suggérant que l'effet d'interférence pendant le test de Stroop serait donc dépendant à la fois de la rapidité de lecture et de l'efficacité du mécanisme inhibiteur, mais pas de la capacité à rapidement dénommer les couleurs.

Ces résultats recourent ceux de notre première étude, qui a montré de meilleures performances pour l'interférence de Stroop chez les sujets n'expérimentant que peu de symptômes et ne présentant aucun dysfonctionnement A-V en comparaison des sujets symptomatiques présentant une insuffisance de convergence. Sur l'ensemble de l'échantillon, l'effet d'interférence était aussi positivement corrélé à plusieurs tests cliniques mesurant les capacités maximales de vergence et d'accommodation. Ces résultats suggèrent d'autant plus l'existence d'un lien plus profond entre processus visuels impliqués dans la vision simple et nette, processus cognitifs et déploiement attentionnel. En effet, les aires corticales impliquées dans le contrôle des mouvements de vergence, de saccade et la réponse accommodative (cortex visuel, pariétal et frontal ; Leigh et Zee, 2016 ; Gamlin, 1999) sont aussi similaires à celles impliquées dans le contrôle attentionnel et la cognition (réseau fronto-pariétal). Cependant, comme développé précédemment, les mécanismes qui lient ces différents processus restent à approfondir.

Les publications associant l'étude des mouvements oculaires et de la motricité binoculaire fine pendant les épreuves du test de Stroop sont manquantes. De plus, se focaliser sur la motricité fine pendant des épreuves où l'exploration visuelle est similaire mais la demande cognitive est différente pourrait nous renseigner un peu plus sur les interactions entre vision et cognition.

Objectifs de l'étude

Nous avons décidé ici d'aborder l'expérimentation en induisant un conflit A-V pendant les différentes tâches du test de Stroop. Associé à cela, nous avons enregistré objectivement les mouvements oculaires, ce qui nous a permis de mieux apprécier certains paramètres comme celui de la durée des fixations pendant chaque épreuve du test. Les objectifs de cette étude sont multiples : (1) observer objectivement la motricité binoculaire fine pendant les différentes tâches du test de Stroop, celle-ci pouvant être influencée par le niveau cognitif réclamé par la tâche ; (2) étudier dans quelle mesure un conflit A-V induit peut impacter la motricité binoculaire fine pendant les différentes tâches du test de Stroop ; (3) tester dans quelle mesure un conflit A-V induit peut impacter la performance cognitive.

Méthode

Sujets

Vingt et un étudiants volontaires, provenant majoritairement du Lycée d'Optique Fresnel à Paris et âgés de 19 à 23 ans (moyenne 20.9 ± 1.45 ans), ont participé à l'expérience (11 hommes, 10 femmes). Ils présentaient tous une vision binoculaire normale : acuité visuelle au minimum de 10/10^{ème} sur chaque œil, acuité stéréoscopique $\leq 40''$; pas d'amblyopie, de paralysie/parésie oculomotrice ni de strabisme, pas d'hyperphorie $\geq 1\Delta$, pas de suppression ni de disparité de fixation en vision lointaine comme proche, pas d'antécédent de chirurgie oculaire, pas de problème de vision des couleurs pas de trouble neurologique. De plus, aucun d'entre eux ne présentait de dysfonctionnement de la vergence et de l'accommodation, au regard des normes établies par Scheiman et Wick (2014). Trois sujets ont tout de même par la suite été écartés de l'étude, car ils n'arrivaient pas à percevoir les stimuli de façon simple, nette et durable pendant les différentes conditions de conflit. Ils n'entrent donc pas dans l'analyse finale.

Expérimentation

Chaque sujet était assis devant un écran d'ordinateur placé à 50cm, sur lequel étaient projetés les stimuli. Les mouvements oculaires ont été enregistrés à l'aide de l'eye tracker EyeSeeCam (University of Munich Hospital, Clinical Neuroscience, Munich, Germany, voir <http://eyeseecam.com/>) et chacun portait en plus de ses corrections habituelles une lunette d'essai (Oculus Adult UB3, Zeiss) permettant par la suite de placer tour à tour les verres sphériques ou les prismes dans les conditions de conflit induit. Chacune des tâches du test de Stroop était précédée d'une calibration à 5 points comme décrit dans la méthodologie générale.

Test de Stroop : les différentes tâches de Stroop (voir méthodologie générale) ont été présentées aléatoirement pour chaque sujet. Cependant, afin d'éviter les effets d'entraînements trop importants, chacune d'entre elles ne pouvait pas être suivie d'une tâche identique, même lorsque la condition changeait. A la fin de chaque tâche, il était demandé au sujet de fermer les yeux pendant une minute, afin de pouvoir préparer la tâche/condition suivante et pour éviter que le conflit induit ne perdure.

Conditions : chaque sujet a accompli les trois tâches de Stroop dans 3 conditions différentes : (1) une condition Contrôle, portant uniquement sa correction habituelle ; (2) une condition

Prismatique, portant sa correction habituelle associée à un prisme de 8Δ en base externe sur chaque œil (soit une demande de convergence augmentée d'environ 2.5 angles métriques) ; (3) une condition Verres sphériques, portant sa correction habituelle associée à un verre de puissance -2.5δ sur chaque œil. Nous avons choisi ces valeurs de prismes et de puissance sphérique afin d'engendrer un conflit similaire entre demande accommodative et demande en convergence dans les deux dernières conditions. Afin de minimiser les potentiels effets d'entraînement ou de fatigue, l'ordre des conditions a été réparti aléatoirement pour chacun des sujets.

Bilan optométrique : nous avons utilisé les mêmes méthodes que pendant la première étude.

Enregistrement et analyse des mouvements oculaires : nous avons enregistré les mouvements oculaires de chacun des deux yeux pendant chaque tâche du test de Stroop et chaque condition. Pour 20 sujets, 90 à 95% des signaux ont pu être récupérés et analysés, 5 à 10% ont été rejetés, essentiellement à cause des clignements ou des pertes de signaux pendant l'enregistrement, et particulièrement pendant les phases de fixation. Pour un sujet, pendant les tâches d'interférence et de dénomination, 30% des saccades ont dû être rejetées pour les mêmes raisons. Il est important de signaler que deux sujets ont rapporté être déstabilisés par les distorsions entraînées par le port des prismes pendant la condition Prismatique, sans pour autant expérimenter de vision double, et que deux autres sujets ont rapporté avoir ressenti des maux de tête durant la condition Verres sphériques, sans pour autant expérimenter de vision floue.

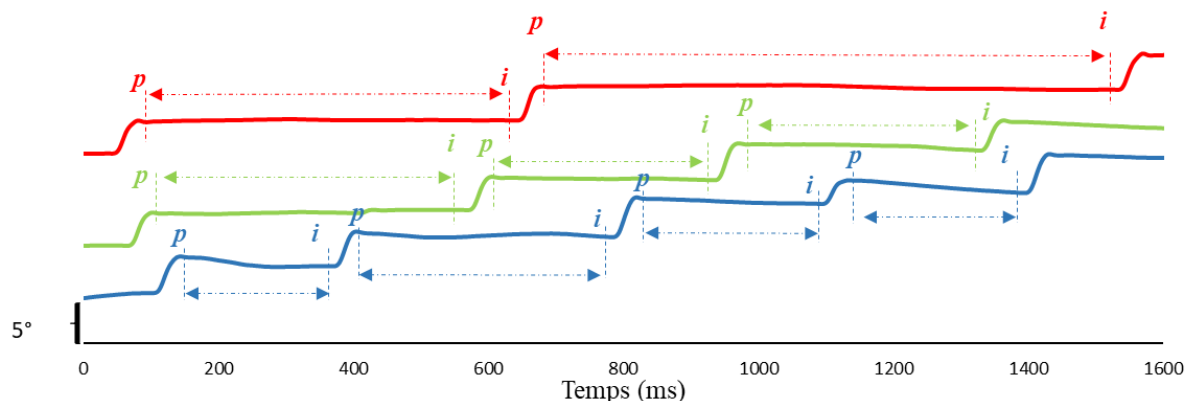


Figure 1 : évolution du tracé du signal conjugué dans le temps pour le même sujet (s. 17) pendant l'accomplissement de la tâche de lecture (tracé bleu), de la tâche de dénomination (tracé vert) et de la tâche d'interférence (tracé rouge). Les durées de fixation sont présentées entre la fin d'une saccade (« p ») et le début de la suivante (« i » suivant).

Résultats du test de Stroop

De façon similaire à l'étude précédente, nous avons récupéré les temps d'accomplissement de chaque tâche et dans chaque condition, ainsi que le nombre d'erreurs corrigées et non corrigées commises. Après l'analyse des mouvements oculaires, nous avons décidé d'appliquer les mêmes calculs concernant l'effet de couleur (EC) et l'effet d'interférence (EI) en utilisant cette fois les valeurs moyennes des durées de fixation pendant les 3 différentes tâches.

Nous avons donc récupéré pour chaque condition les temps d'accomplissement totaux, les valeurs moyennes des durées de fixation, les scores d'erreurs calculés de la même façon que pendant l'étude précédente, ainsi que les temps relatifs aux effets de couleurs (EC) et d'interférence (EI) calculés à l'aide des temps d'accomplissement totaux et des durées moyennes de fixation.

Analyse statistique

Nous avons d'abord souhaité nous focaliser sur la condition Contrôle de chacun des participants, afin de constater si la motricité était similaire quelque soit la demande cognitive de la tâche, étant donné que les stimuli étaient espacés de la même façon dans les 3 tâches du test de Stroop.

Par la suite, nous avons comparé les résultats de chacune des tâches de Stroop en fonction des conditions dans lesquelles elles avaient été accomplies. La demande cognitive n'étant pas identique dans les 3 tâches, nous souhaitions savoir si les conditions avaient pu moduler certains paramètres concernant la motricité binoculaire fine ou l'aspect temporel des fixations. Nous nous sommes donc attachés à comparer les résultats de chaque tâche une à une.

Résultats

Condition Contrôle et test de Stroop : niveau cognitif et paramètres des saccades

Amplitudes des saccades de progression : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif de la tâche sur l'amplitude des saccades progressives ($X^2(21, 2) = 8.67, p = 0.013$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les tâches d'interférence et de lecture ($3.51 \pm 0.29^\circ$ vs $3.69 \pm 0.29^\circ$; $Z = 2.59, p = 0.0096$) ainsi qu'entre les tâches d'interférence et de dénomination ($3.51 \pm 0.29^\circ$ vs $3.65 \pm 0.29^\circ$; $Z = 2.41, p = 0.016$). Il n'y avait pas de différence significative concernant l'amplitude des saccades progressives entre les tâches de lecture et de dénomination ($3.69 \pm 0.29^\circ$ vs $3.65 \pm 0.29^\circ$; $Z = 0.99, p = 0.32$). Les résultats sont présentés sur la Figure 2A et dans la Table 2.

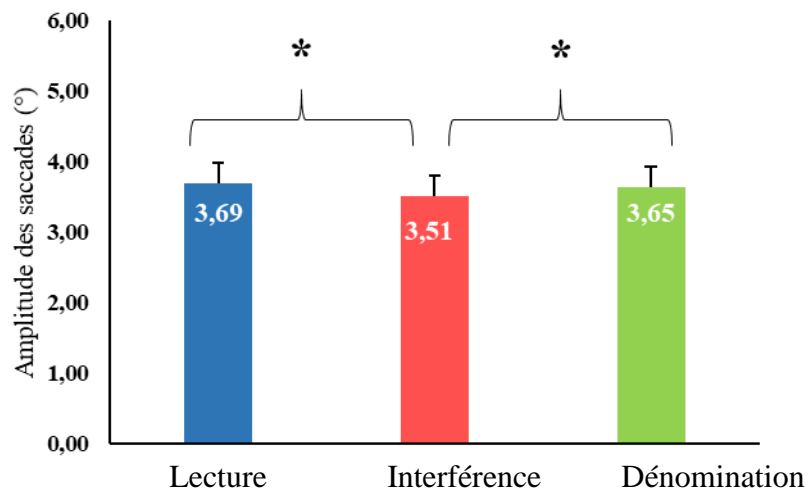


Figure 2A : Valeurs moyennes et écart-types de l'amplitude des saccades de progression en degrés pour les tâches de lecture (bleu), de dénomination (vert) et d'interférence (rouge) dans la condition Contrôle. Les différences significatives sont indiquées par un astérisque pour $p < 0.05$ (*).

Vitesse des saccades de progression : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif de la tâche sur la vitesse des saccades progressives ($X^2(21, 2) = 8.67, p = 0.013$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les tâches d'interférence et de lecture ($90.44 \pm 9.23^\circ/s$ vs $94.92 \pm 10.60^\circ/s$; $Z = 2.49, p = 0.0129$) ainsi qu'entre les tâches d'interférence et de dénomination ($90.44 \pm 9.23^\circ/s$ vs $94.04 \pm 10.47^\circ/s$; $Z = 2.31, p = 0.021$). Il n'y avait pas de différence significative concernant l'amplitude des saccades progressives entre les tâches de lecture et de dénomination ($94.92 \pm 10.60^\circ/s$ vs $94.04 \pm 10.47^\circ/s$; $Z = 0.75, p = 0.45$). Les résultats sont présentés sur la Figure 2B et dans la Table 2.

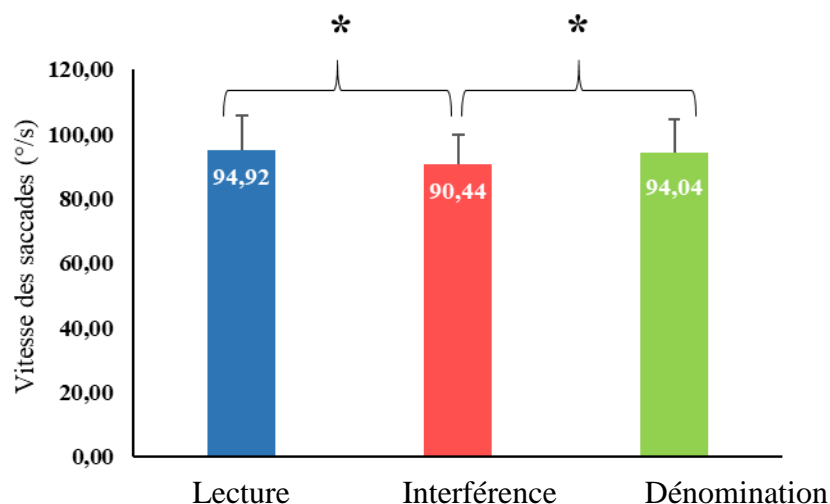


Figure 2B : Valeurs moyennes et écart-types de la vitesse des saccades de progression en degrés/seconde pour les tâches de lecture (bleu), de dénomination (vert) et d'interférence (rouge) dans la condition Contrôle. Les différences significatives sont indiquées par un astérisque pour $p < 0.05$ (*).

Durée des fixations après les saccades de progression : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif de la tâche sur la durée des fixations ($X^2(21, 2) = 42, p < 0.0001$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les tâches d'interférence et de lecture ($543.45 \pm 90.04\text{ms}$ vs $327.59 \pm 87.58\text{ms}$; $Z = 4.01, p = 0.00006$), entre les tâches d'interférence et de dénomination ($543.45 \pm 90.04\text{ms}$ vs $432.01 \pm 61.85\text{ms}$; $Z = 4.01, p = 0.00006$) ainsi qu'entre les tâches de lecture et de dénomination ($327.59 \pm 87.58\text{ms}$ vs $432.01 \pm 61.85\text{ms}$; $Z = 4.01, p = 0.00006$). Les résultats sont présentés sur la Figure 2C et dans la Table 2.

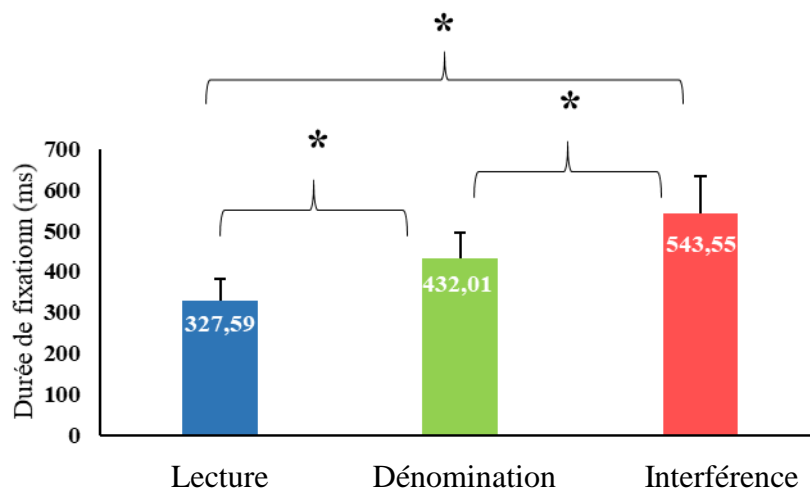


Figure 2C : Valeurs moyennes et écart-types des durées de fixation après des saccades progressives en millisecondes (ms) pour les tâches de lecture (bleu), de dénomination (vert) et d'interférence (rouge) dans la condition Contrôle. Les différences significatives sont indiquées par un astérisque pour $p < 0.05$ (*).

Disconjugaison pendant les saccades progressives : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif de la tâche sur ce paramètre, que ce soit concernant sa valeur algébrique ($X^2(21, 2) = 0.095, p = 0.95$) ou sa valeur absolue ($X^2(21, 2) = 0.286, p = 0.87$). Les résultats sont présentés sur la Table 2.

Corrélation entre disconjugaison intra-saccadique et glissade disconjuguée pendant la fixation : des corrélations significatives (Spearman, $p < 0.01$) ont été retrouvées entre l'amplitude des disconjugaisons intra-saccadiques et l'amplitude des glissades disconjuguées qui les suivaient pendant les fixations mesurées après 80 ms comme après 160ms, et ce pour chacune des tâches du test de Stroop en utilisant l'ensemble des saccades réalisées par les sujets (voir Fig. 3). Ces résultats indiquent que la disconjugaison pendant la saccade a été efficacement corrigée pendant la fixation (voir Vernet et al., 2009), et que la qualité de cette relation apparaît être similaire quelque soit la tâche cognitive exigée. Nous ne retrouvons donc pas de déstabilisation notable liée à une éventuelle demande cognitive plus importante. Un plus grand coefficient de corrélation a cependant été retrouvé concernant la tâche de dénomination ($r_s = -0.494$ calculé après 80ms, $r_s = -0.487$ calculé après 160ms) en comparaison à la tâche de lecture ($r_s = -0.435$ calculé après 80ms, $r_s = -0.421$ calculé après 160ms) ou d'interférence ($r_s = -0.477$ calculé après 80ms, $r_s = -0.449$ calculé après 160ms), ceci pouvant être lié à la nature des cibles (points contre mots).

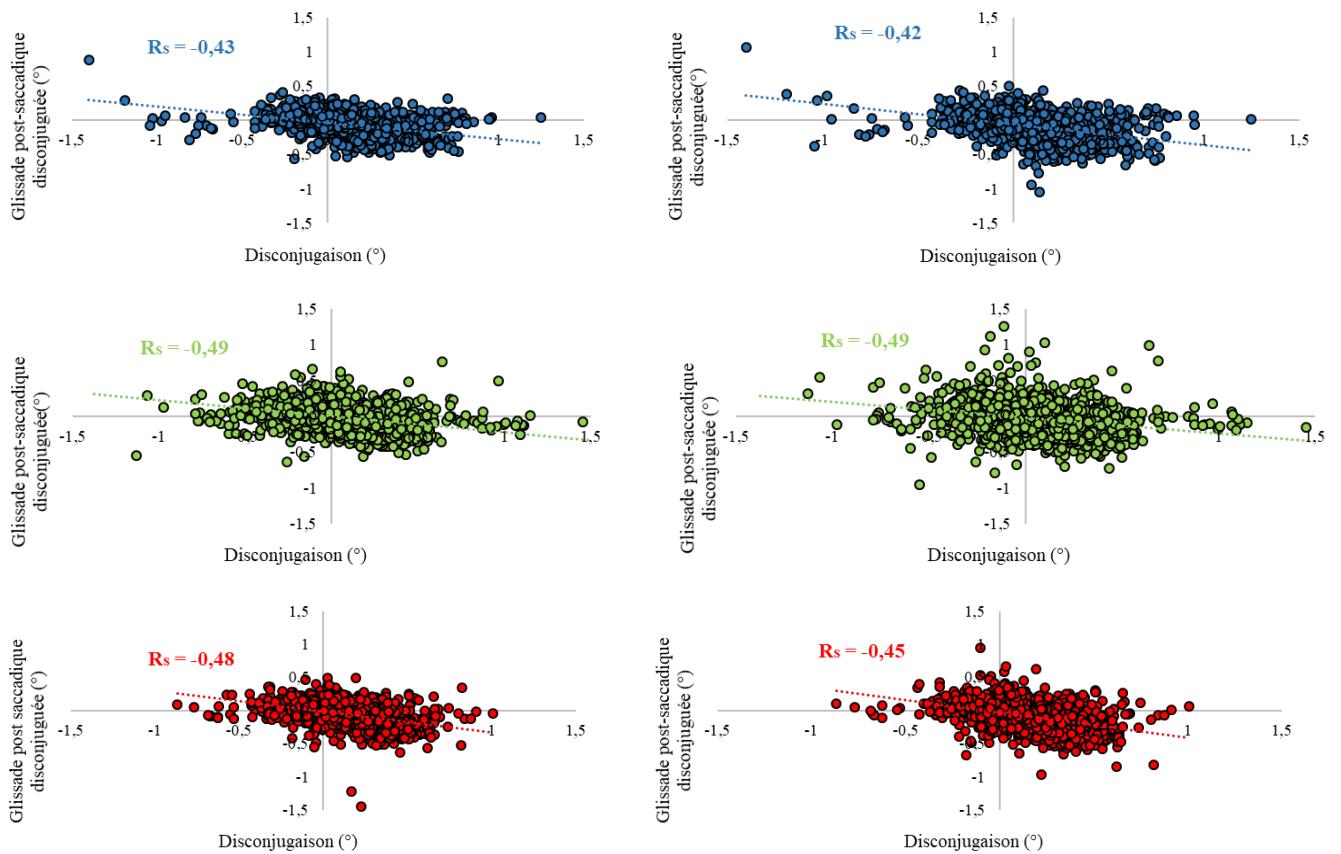


Figure 3 : Diagrammes de dispersion représentant l'amplitude de la glissade post-saccadique disconjuguée en degrés (°) mesurée après 80ms (figure de gauche) et après 160ms (figure de droite) en fonction de l'amplitude de la disconjugaison intra-saccadique en degrés (°) pendant les tâches de lecture (bleu), de dénomination (vert) et d'interférence (rouge) dans la condition Contrôle. L'entièreté des saccades mesurée chez chaque sujet a été prise en compte sur les graphiques. Les coefficients de corrélation de Spearman (Rs) sont indiqués.

Amplitude de la disparité de fixation : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif de la tâche sur ce paramètre, que ce soit concernant sa valeur algébrique ($X^2(21, 2) = 4.095, p = 0.13$), ou sa valeur absolue ($X^2(21, 2) = 2.95, p = 0.23$). Les résultats sont présentés sur la Table 2.

	Lecture	Dénomination	Interférence
Amplitude des saccades (°) ET	3.69*^{bc} ±0.29	3.65*^{bc} ±0.29	3.51*^{bc} ±0.30
Vitesse des saccades (°/s) ET	38.71*^{bc} ±3.20	38.74*^{bc} ±2.84	38.09*^{bc} ±3.00
Durée de fixation (ms) ET	327.59*^{abc} ±54.88	432.01*^{abc} ±61.85	543.55*^{abc} ±90.04
Disconjugaison (°) Valeur algébrique ET	0.12 ±0.16	0.13 ±0.15	0.13 ±0.15
Disconjugaison (°) Valeur absolue ET	0.20 ±0.13	0.20 ±0.11	0.20 ±0.11
Disparité de fixation (°) Valeur algébrique ET	0.20 ±0.35	0.18 ±0.28	0.14 ±0.31
Disparité de fixation (°) Valeur absolue ET	0.46 ±0.20	0.41 ±0.16	0.42 ±0.18
Coefficient de variabilité Disparité de fixation ET	63.90 ±16.76	66.25 ±10.88	74.25 ±22.32

Table 2 : Valeurs moyennes (en gras) et écart-types (ET) des principaux résultats concernant les paramètres des saccades et des fixations pendant les différentes tâches du test de Stroop (Lecture en bleu, Dénomination en vert, Interférence en rouge) pour la condition Contrôle. Les différences significatives ($p < 0.05$) dépendantes de la tâche ont été indiquées par un astérisque (*).

^a Différence significative entre les résultats pendant la tâche de lecture et la tâche de dénomination

^b Différence significative entre les résultats pendant la tâche d'interférence et la tâche de dénomination

^c Différence significative entre les résultats pendant la tâche d'interférence et la tâche de lecture

Impact d'un conflit A-V induit sur les saccades et les fixations

Amplitudes des saccades progressives : comme les cibles étaient espacées de façon égale, nous avons avant tout étudié les saccades progressives. Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur l'amplitude des saccades progressives, que cela soit pour l'épreuve de lecture ($X^2(21, 2) = 1.14, p = 0.56$), de dénomination ($X^2(21, 2) = 2.95, p = 0.23$) ou d'interférence ($X^2(21, 2) = 0.67, p = 0.72$). Les résultats sont présentés en Table 3.

Vitesse des saccades progressives : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur la vitesse des saccades pendant la tâche de lecture ($X^2(21, 2) = 9.81, p = 0.007$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Prismes et Verres sphériques ($93.17 \pm 9.66^\circ/s$ contre $97.69 \pm 11.01^\circ/s$; $Z = 3.08, p = 0.002$) ainsi qu'entre les conditions Contrôle et Verres sphériques ($94.92 \pm 10.60^\circ/s$ contre $97.69 \pm 11.01^\circ/s$; $Z = 1.99, p = 0.045$).

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur la vitesse des saccades pendant la tâche de dénomination ($X^2(21, 2) = 7.14, p < 0.03$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Contrôle et Verres sphériques ($94.04 \pm 10.47^\circ/s$ contre $98.38 \pm 11.49^\circ/s$; $Z = 2.62, p = 0.009$), ainsi qu'entre les conditions Prismes et Verres sphériques ($95.66 \pm 10.71^\circ/s$ contre $98.38 \pm 11.49^\circ/s$; $Z = 2.03, p = 0.04$).

Cependant, aucun effet significatif des conditions sur la vitesse des saccades n'a été retrouvé pendant la tâche d'interférence ($X^2(21, 2) = 3.71; p = 0.16$). Les résultats sont présentés sur la Figure 4A et sur la Table 3.

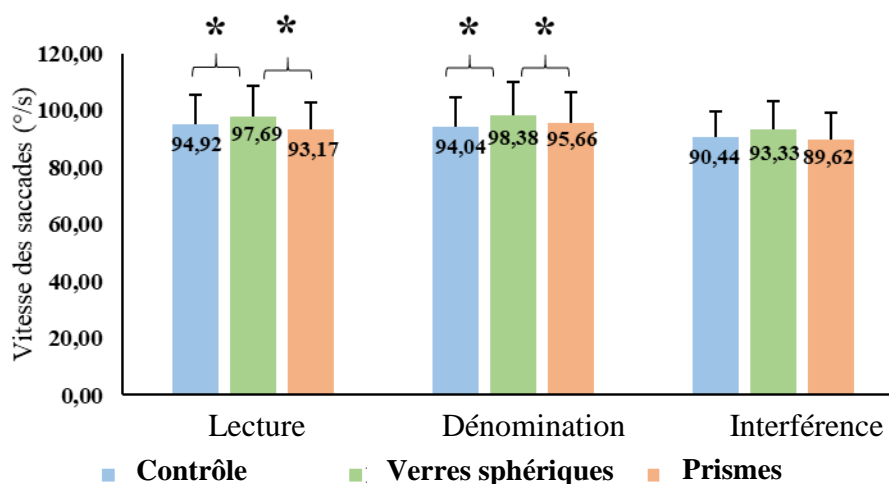


Figure 4A : Valeurs moyennes et écart-types concernant la vitesse des saccades de progression (°/s) pendant les trois tâches du test de Stroop dans la condition Contrôle (bleu clair), Verres sphériques (vert) et Prismes (orange). Les différences significatives ($p < 0.05$) sont indiquées par un astérisque (*).

Disconjugaison pendant la saccade : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur la disconjugaison pendant la tâche de lecture ($X^2(21, 2) = 10.57$; $p = 0.005$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Verres sphériques et Prismes ($0.16 \pm 0.18^\circ$ vs $0.06 \pm 0.17^\circ$; $Z = 3.42$, $p = 0.0006$) ainsi qu'entre les conditions Contrôle et Prismes ($0.12 \pm 0.16^\circ$ contre $0.06 \pm 0.17^\circ$; $Z = 1.96$, $p = 0.049$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les conditions Contrôle et Verres sphériques pendant la tâche de lecture ($0.12 \pm 0.16^\circ$ contre $0.16 \pm 0.18^\circ$; $Z = 1.79$, $p = 0.07$).

Concernant la tâche de dénomination, le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur la disconjugaison ($X^2(21, 2) = 7.24$; $p = 0.026$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Prismes et Contrôle ($0.07 \pm 0.22^\circ$ vs $0.13 \pm 0.15^\circ$; $Z = 2.42$, $p = 0.016$) ainsi qu'entre les conditions Prismes et Verres sphériques ($0.07 \pm 0.22^\circ$ contre $0.13 \pm 0.18^\circ$; $Z = 2.28$, $p = 0.023$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les conditions Contrôle et Verres sphériques pendant la tâche de dénomination ($0.13 \pm 0.15^\circ$ contre $0.13 \pm 0.18^\circ$; $Z = 0.12$, $p = 0.90$).

Des résultats similaires ont été retrouvés pendant la tâche d'interférence, avec un signe de disconjugaison plus négatif dans la condition Prismes en comparaison des deux autres, cependant ces différences sont restées en dessous du seuil significatif ($X^2(21, 2) = 3.43$; $p = 0.18$). Ces résultats sont présentés sur la Figure 4B et sur la Table 3.

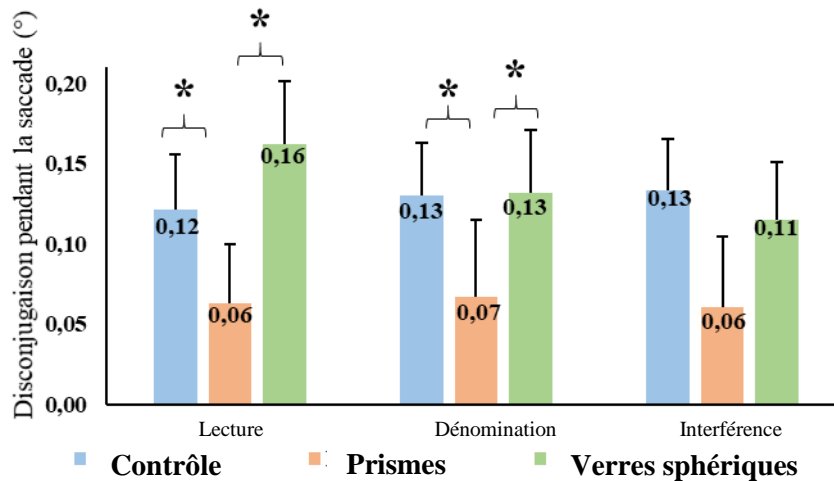


Figure 4B : Valeurs moyennes et erreur-types concernant la valeur algébrique des disconjugaisons (°) pendant les trois tâches du test de Stroop dans la condition Contrôle (bleu clair), Verres sphériques (vert) et Prismes (orange). Les différences significatives ($p < 0.05$) sont indiquées par un astérisque (*).

Concernant la valeur absolue de la disconjugaison pendant les saccades, le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions, que cela soit pour l'épreuve de lecture ($X^2(21, 2) = 0.67$; $p = 0.72$), de dénomination ($X^2(21, 2) = 3.52$; $p = 0.17$) ou d'interférence ($X^2(21, 2) = 0.67$; $p = 0.72$), indiquant que ce paramètre était resté similaire dans toutes les conditions. Les résultats sont présentés en Table 3.

Glissade post-saccadique disconjuguée mesurée après 80ms : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur l'amplitude de la glissade post-saccadique disconjuguée pendant la tâche de lecture ($X^2(21, 2) = 9.52$; $p = 0.0085$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Verres sphériques et Prismes ($-0.08 \pm 0.12^\circ$ contre $-0.03 \pm 0.13^\circ$; $Z = 3.42$, $p = 0.0006$), entre les conditions Contrôle et Prismes ($-0.07 \pm 0.12^\circ$ contre $-0.03 \pm 0.13^\circ$; $Z = 2.24$, $p = 0.025$), ainsi qu'entre les conditions Contrôle et Verres sphériques ($-0.07 \pm 0.12^\circ$ contre $-0.08 \pm 0.12^\circ$; $Z = 2.38$, $p = 0.017$).

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur l'amplitude de la glissade post-saccadique disconjuguée pendant la tâche de dénomination ($X^2(21, 2) = 12.67$; $p = 0.0018$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Verres sphériques et Prismes ($-0.07 \pm 0.13^\circ$ contre $-0.02 \pm 0.12^\circ$; $Z = 3.006$, $p = 0.003$), ainsi qu'entre les conditions Contrôle et Prismes ($-0.05 \pm 0.12^\circ$ contre $-0.02 \pm 0.12^\circ$; $Z = 2.41$, $p = 0.016$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les conditions Contrôle et Verres sphériques pendant la tâche de dénomination ($-0.05 \pm 0.12^\circ$ vs $-0.07 \pm 0.13^\circ$; $Z = 1.48$, $p = 0.14$).

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur l'amplitude de la glissade post-saccadique disconjuguée pendant la tâche d'interférence ($X^2(21, 2) = 10.29$; $p = 0.0058$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Verres sphériques et Prismes ($-0.06 \pm 0.12^\circ$ contre $-0.03 \pm 0.12^\circ$; $Z = 3.18$, $p = 0.001$), ainsi qu'entre les conditions Contrôle et Prismes ($-0.06 \pm 0.11^\circ$ contre $-0.03 \pm 0.12^\circ$; $Z = 2.69$, $p = 0.007$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les conditions Contrôle et Verres sphériques pendant la tâche de dénomination ($-0.06 \pm 0.11^\circ$ vs $-0.06 \pm 0.12^\circ$; $Z = 0.19$, $p = 0.84$). Les résultats sont présentés sur la Figure 4C et sur la Table 3.

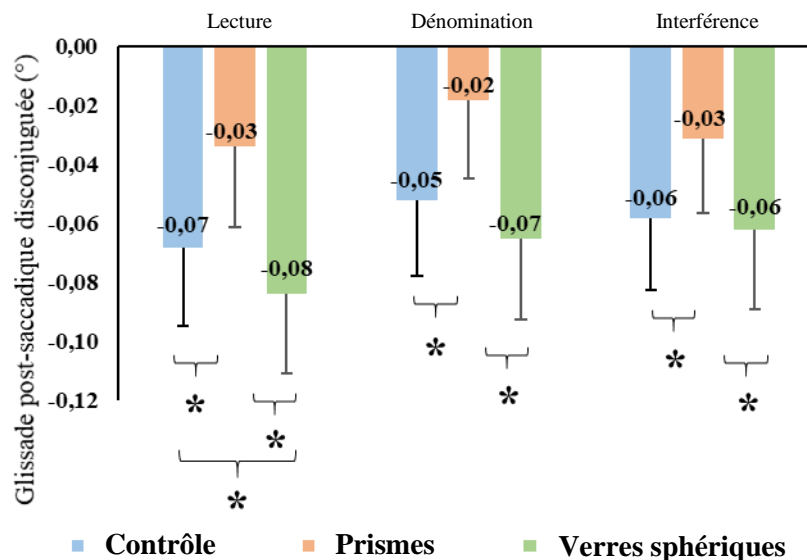


Figure 4C : Valeurs moyennes et erreur-types concernant l'amplitude des glissades post-saccadiques calculées 80ms après la fin des saccades (°) pendant les trois tâches du test de Stroop dans la condition Contrôle (bleu clair), Verres sphériques (vert) et Prismes (orange). Les différences significatives ($p < 0.05$) sont indiquées par un astérisque (*).

Glissade post-saccadique disconjuguée mesurée après 160ms : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur l'amplitude de la glissade post-saccadique disconjuguée pendant la tâche de lecture ($X^2(21, 2) = 9.52$; $p = 0.0085$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Verres sphériques et Prismes ($-0.11 \pm 0.15^\circ$ contre $-0.05 \pm 0.14^\circ$; $Z = 2.79$, $p = 0.005$), entre les conditions Contrôle et Prismes ($-0.10 \pm 0.15^\circ$ contre $-0.05 \pm 0.14^\circ$; $Z = 2.17$, $p = 0.029$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les conditions Contrôle et Verres sphériques pendant la tâche de lecture ($-0.10 \pm 0.15^\circ$ contre $-0.11 \pm 0.15^\circ$; $Z = 1.095$, $p = 0.27$).

Des résultats similaires ont été retrouvés pendant la tâche de dénomination, avec une glissade post-saccadique plus négative dans la condition Prismes en comparaison des deux autres, cependant ces différences sont restées en dessous du seuil significatif ($X^2(21, 2) = 4.95$; $p = 0.08$).

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur l'amplitude de la glissade post-saccadique disconjuguée pendant la tâche d'interférence ($X^2(21, 2) = 12.09$; $p = 0.002$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Verres sphériques et Prismes ($-0.09 \pm 0.15^\circ$ contre $-0.04 \pm 0.13^\circ$; $Z = 3.08$, $p = 0.002$), entre les conditions Contrôle et Prismes ($-0.08 \pm 0.14^\circ$ contre $-0.04 \pm 0.13^\circ$; $Z = 3.15$, $p = 0.0017$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les conditions Contrôle et Verres sphériques pendant la tâche de lecture ($-0.08 \pm 0.14^\circ$ contre $-0.09 \pm 0.15^\circ$; $Z = 0.78$, $p = 0.43$).

Ces résultats sont en cohérence avec ceux de l'amplitude de la disconjugaison, d'autant plus que ces deux paramètres s'avèrent souvent être corrélés.

Disparité de fixation (valeur algébrique) : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur l'amplitude de la disparité de fixation pendant la tâche de lecture ($X^2(21, 2) = 7.24$; $p = 0.027$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Prismes et Verres sphériques ($0.12 \pm 0.31^\circ$ contre $0.30 \pm 0.39^\circ$; $Z = 2.902$, $p = 0.0037$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les conditions Contrôle et Prismes pendant la tâche de

lecture ($0.19 \pm 0.35^\circ$ contre $0.12 \pm 0.31^\circ$; $Z = 1.44$, $p = 0.15$) ou entre les conditions Contrôle et Verres sphériques ($0.19 \pm 0.35^\circ$ contre $0.30 \pm 0.39^\circ$; $Z = 1.93$, $p = 0.054$).

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur l'amplitude des disparités de fixation pendant les tâches de dénomination ($X^2(21, 2) = 0.67$; $p = 0.72$) et d'interférence ($X^2(21, 2) = 2.00$; $p = 0.37$). Les résultats sont présentés sur la Figure 4D et la Table 3.

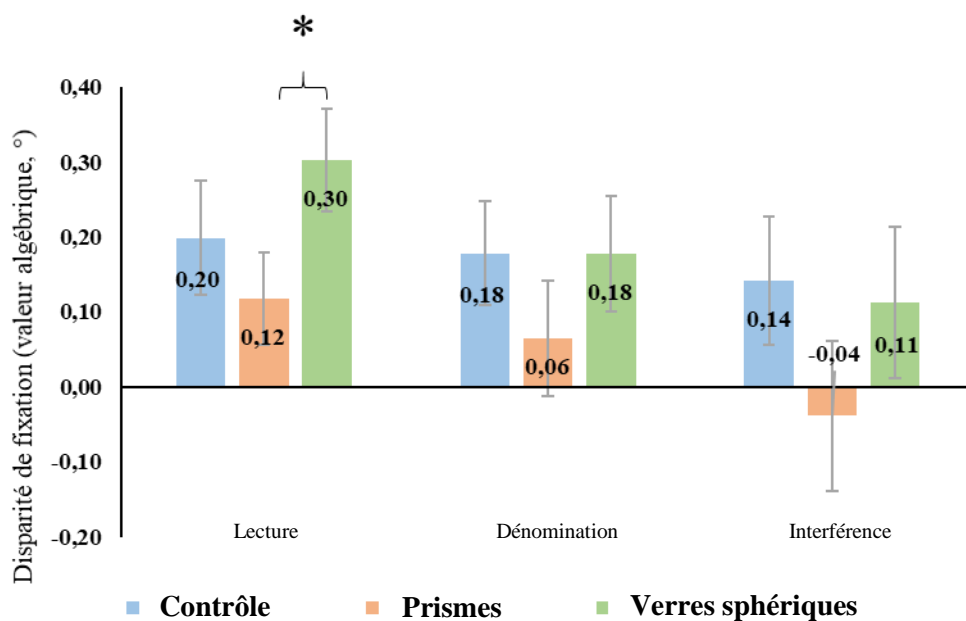


Figure 4D : Valeurs moyennes et erreur-types concernant les valeurs algébriques des amplitudes de disparité de fixation ($^\circ$) pendant les trois tâches du test de Stroop dans la condition Contrôle (bleu clair), Verres sphériques (vert) et Prismes (orange). Les différences significatives ($p < 0.05$) sont indiquées par un astérisque (*).

Disparité de fixation (valeur absolue) : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur l'amplitude de la disparité de fixation pendant la tâche d'interférence ($X^2(21, 2) = 10.57$; $p = 0.0051$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Contrôle et Prismes condition ($0.42 \pm 0.18^\circ$ vs $0.52 \pm 0.22^\circ$; $Z = 1.99$, $p = 0.046$) ainsi qu'entre les conditions Contrôle et Verres sphériques ($0.42 \pm 0.18^\circ$ vs $0.57 \pm 0.21^\circ$; $Z = 2.59$, $p = 0.0096$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les conditions Prismes et Verres sphériques ($0.52 \pm 0.22^\circ$ vs $0.57 \pm 0.21^\circ$; $Z = 0.96$, $p = 0.34$).

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman tend à donner des résultats similaires pendant la tâche de lecture ($X^2(21, 2) = 3.71$; $p = 0.16$) et pendant la tâche de dénomination ($X^2(21, 2) = 5.81$; $p = 0.055$), avec une disparité de fixation plus faible en condition Contrôle, cependant ces différences sont restées en dessous du seuil significatif. Les résultats sont présentés en Figure 4E et en Table 3.

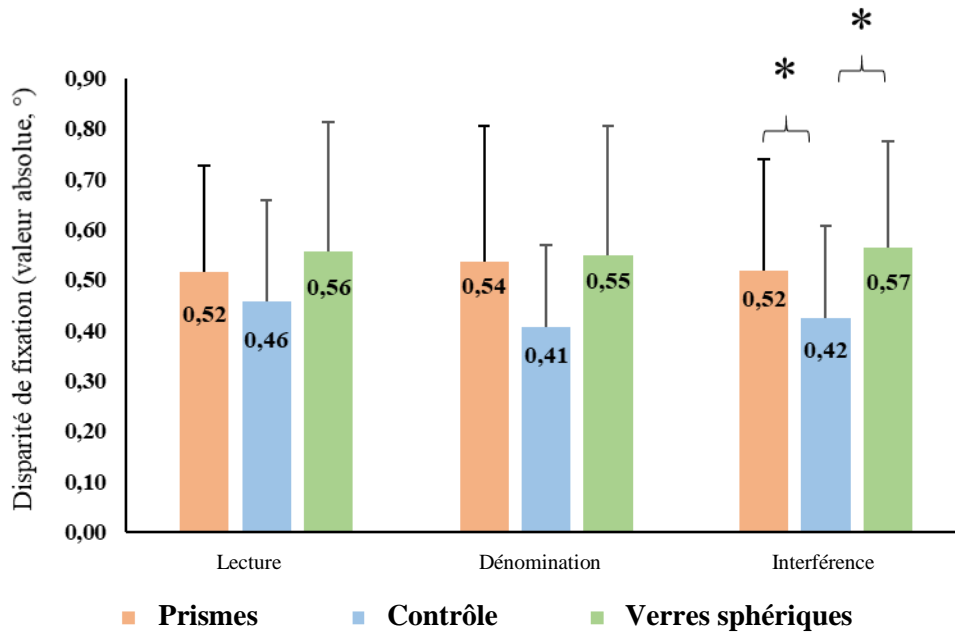


Figure 4E : Valeurs moyennes et écart-types concernant les valeurs absolues des amplitudes de disparité de fixation (°) pendant les trois tâches du test de Stroop dans la condition Contrôle (bleu clair), Verres sphériques (vert) et Prismes (orange). Les différences significatives ($p < 0.05$) sont indiquées par un astérisque (*).

Coefficient de variabilité de la disparité de fixation (valeur absolue) : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur la variabilité de la disparité de fixation pendant la tâche de lecture ($X^2(21, 2) = 6.00$; $p = 0.049$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Contrôle et Prismes (63.9 ± 16.76 contre 74.43 ± 18.47 ; $Z = 3.15$, $p = 0.0017$), entre les conditions Prismes et Verres sphériques (74.43 ± 18.47 contre 63.17 ± 23.05 ; $Z = 2.17$, $p = 0.029$), mais pas entre les conditions Contrôle et Verres sphériques (63.9 ± 16.76 contre 63.17 ± 23.05 ; $Z = 0.19$, $p = 0.85$).

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur la variabilité de la disparité de fixation pendant la tâche de dénomination ($X^2(21, 2) = 10.29$; $p = 0.0058$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Contrôle et Prismes (66.25 ± 10.88 contre 85.69 ± 26.74 ; $Z = 3.04$, $p = 0.0023$), ainsi qu'entre les conditions Prismes et Verres sphériques (85.69 ± 26.74 contre 62.34 ± 21.83 ; $Z = 3.006$, $p = 0.0026$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre les conditions Contrôle et Verres sphériques pendant la tâche de dénomination (66.25 ± 10.88 contre 62.34 ± 21.83 ; $Z = 0.89$, $p = 0.38$).

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman tend à donner des résultats similaires pendant la tâche d'interférence ($X^2(21, 2) = 4.09$; $p = 0.13$), avec une variabilité plus importante en condition Prismes, cependant ces différences sont restées en dessous du seuil significatif. Les résultats sont présentés en Figure 4F et en Table 3.

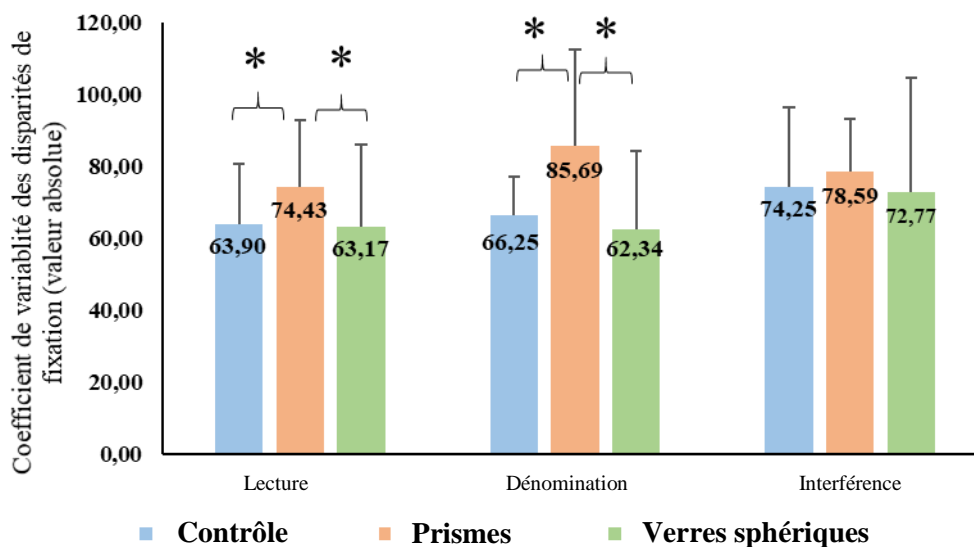


Figure 4F : Valeurs moyennes et écart-types concernant les coefficients de variabilité des disparités de fixation (valeur absolue, °) pendant les trois tâches du test de Stroop dans la condition Contrôle (bleu clair), Verres sphériques (vert) et Prismes (orange). Les différences significatives ($p < 0.05$) sont indiquées par un astérisque (*).

<u>Tâche de Stroop</u> <u>Condition</u>	Lecture			Dénomination			Interférence		
	Contrôle	Prismes	Verres	Contrôle	Prismes	Verres	Contrôle	Prismes	Verres
Amplitude des saccades (°)	3.69	3.65	3.70	3.65	3.74	3.74	3.51	3.48	3.55
	±0.29	±0.33	±0.33	±0.29	±0.35	±0.37	±0.30	±0.33	±0.36
Vitesse des saccades (°/s)	94.92*²³	93.17*²³	97.69*²³	94.04*²³	95.66*²³	98.38*²³	90.44	89.62	93.33
	±10.60	±9.66	±11.01	±10.47	±10.72	±11.50	±9.23	±9.54	±10.07
Durée de fixation (ms)	327.59	345.23	335.71	432.01	440.38	425.30	543.55	594.46	574.22
	±54.88	±83.24	±59.82	±61.85	±96.29	±71.79	±90.04	±158.96	±122.32
Disconjugaison (°) <i>Valeur algébrique</i>	0.12*¹³	0.06*¹³	0.16*¹³	0.13*¹³	0.07*¹³	0.13*¹³	0.13	0.06	0.11
	±0.16	±0.17	±0.18	±0.15	±0.22	±0.18	±0.15	±0.20	±0.17
Disconjugaison (°) <i>Valeur absolue</i>	0.20	0.21	0.23	0.20	0.22	0.23	0.20	0.22	0.21
	±0.13	±0.10	±0.13	±0.11	±0.13	±0.11	±0.11	±0.11	±0.10
Glissade post-saccadic disconjugée (°) <i>Après 80 ms</i>	-0.07*¹²³	-0.03*¹²³	-0.08*¹²³	-0.05*¹³	-0.02*¹³	-0.07*¹³	-0.06*¹³	-0.03*¹³	- 0.06*¹³
	±0.12	±0.13	±0.12	±0.12	±0.12	±0.13	±0.11	±0.12	±0.12
Glissade post-saccadic disconjugée (°) <i>Après 160 ms</i>	-0.10*¹³	-0.05*¹³	-0.11*¹³	-0.08	-0.04	-0.08	-0.08*¹³	-0.04*¹³	- 0.09*¹³
	±0.15	±0.14	±0.15	±0.14	±0.14	±0.15	±0.14	±0.13	±0.14
Disparité de fixation (°) <i>Valeur algébrique</i>	0.20	0.12*^c	0.30*^c	0.18	0.06	0.18	0.14	-0.04	0.11
	±0.35	±0.32	±0.39	±0.28	±0.35	±0.46	±0.31	±0.35	±0.46
Disparité de fixation (°) <i>Valeur absolue</i>	0.46	0.52	0.56	0.41	0.54	0.55	0.42*¹²	0.52*¹²	0.57*¹²
	±0.20	±0.21	±0.26	±0.16	±0.27	±0.26	±0.18	±0.22	±0.21
Coefficient de variabilité <i>Disparité de fixation</i>	63.90*¹³	74.43*¹³	63.17*¹³	66.25*¹³	85.69*¹³	62.34*¹³	74.25	78.59	72.77
	±16.76	±18.47	±23.05	±10.88	±26.74	±21.83	±22.32	±14.68	±31.91

Table 3 (p263) : Valeurs moyennes (caractères gras) et écart-types des principaux résultats relatifs aux paramètres des saccades et fixations dans la condition Contrôle (bleu clair), Prismes (orange) et Verres sphériques (vert), pendant les tâches de lecture, de dénomination et d'interférence du test de Stroop. Les différences significatives ($p < 0.05$) retrouvées entre les différentes conditions sont indiquées par un astérisque (*).

¹Différence significative entre la condition Contrôle et la condition Prismes

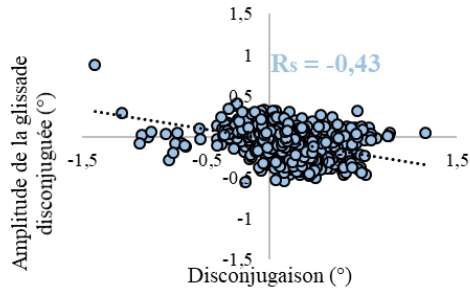
²Différence significative entre la condition Contrôle et la condition Verres sphériques

³Différence significative entre la condition Prismes et la condition Verres sphériques

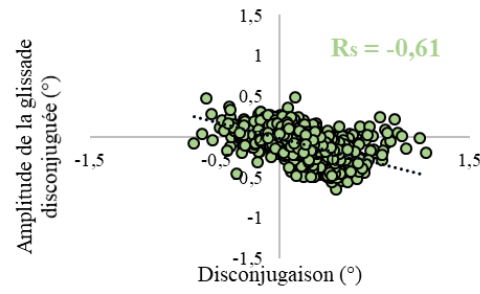
Corrélation entre disconjugaison intra-saccadique et glissade disconjuguée pendant la fixation : des corrélations significatives (Spearman, $p < 0.01$) ont été retrouvées entre l'amplitude des disconjugaisons intra-saccadique et l'amplitude des glissades disconjuguées qui les suivaient pendant les fixations mesurées après 80 ms, et ce dans chacune des conditions en utilisant l'ensemble des saccades réalisées par les sujets. Cependant, les résultats indiquent que même si la disconjugaison pendant la saccade apparaît ici encore corrigée en partie pendant le début de la fixation par la glissade disconjuguée quel que soit la condition, cette relation apparaît détériorée dans la condition Prismes. En effet, des coefficients de corrélations plus faibles sont retrouvés quel que soit la tâche du test de Stroop étudié, en comparaison des conditions Contrôle et Verres sphériques (voir Fig. 5)

Lecture

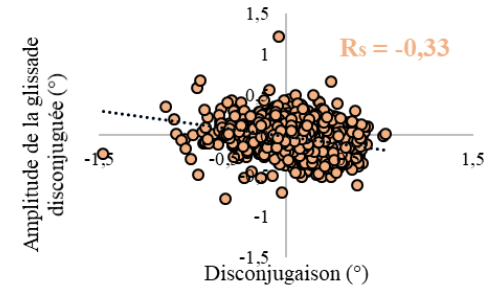
Condition Contrôle



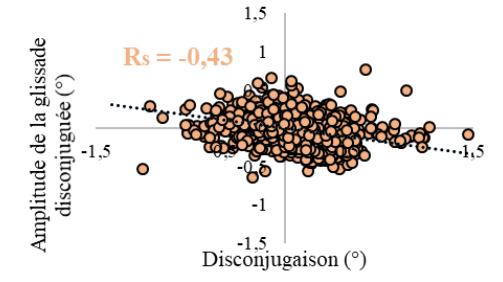
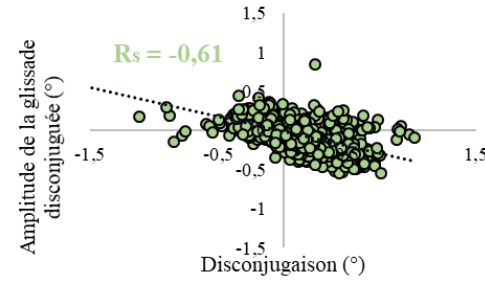
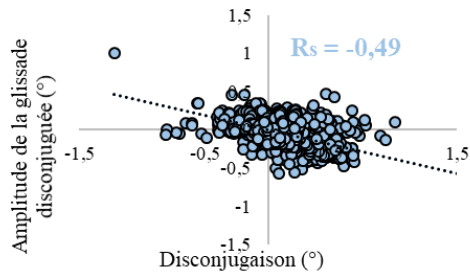
Condition Verres sphériques



Condition Prismes



Dénomination



Interférence

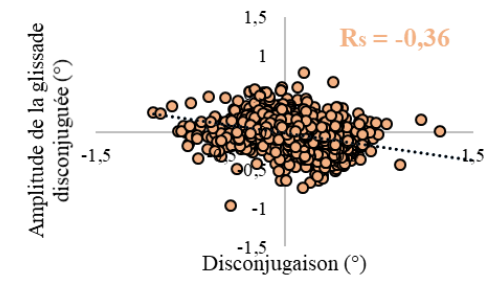
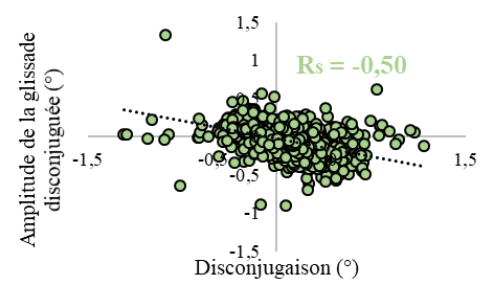
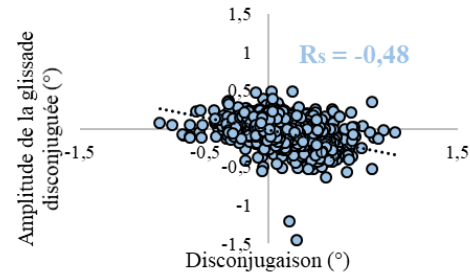


Figure 5 (p265) : Diagramme de dispersion de l'amplitude de la glissade post-saccadique ($^{\circ}$) mesurées 80ms après la fin de la saccade en fonction de l'amplitude de disconjugaison ($^{\circ}$). Les valeurs concernant la condition Contrôle (points bleus), la condition Verres sphériques (points verts) et la condition Prismes (points oranges) sont reportées pour chaque tâche (Lecture, Dénomination et Interférence). Les coefficients de corrélation de Spearman (R_s) sont indiqués.

Analyse temporelle et performances associées au test de Stroop

Temps total de passation des épreuves et moyenne des durées de fixation

Les saccades étant des mouvements très rapides à réaliser, les temps de fixation pendant le test de Stroop ont représenté, comme pendant la lecture, la majeure partie de la durée de chaque passation. Nous avons réalisé une analyse de corrélation de Spearman afin de savoir si les moyennes des durées de fixation enregistrées reflétaient le temps total de passation des différentes épreuves. Comme attendu, les deux mesures étaient corrélées significativement et positivement pour toutes les conditions et dans toutes les tâches du test de Stroop ($p < 0.05$). Il est important de noter que nous n'avons tenu compte que des durées de fixation après les saccades progressives et non après les saccades de régression, réalisées pendant le test de Stroop après des hésitations ou pour corriger des erreurs. Les résultats sont présentés en Figure 6A concernant la condition Contrôle, sur la Figure 6B concernant la condition Prismes, et sur la Figure 6C concernant la condition Verres sphériques.

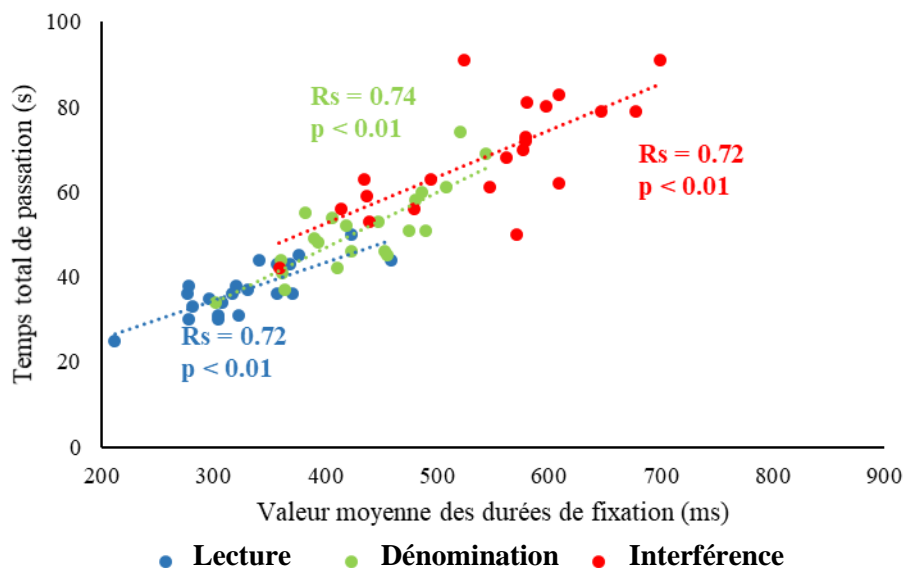


Figure 6A : Diagramme de dispersion des valeurs moyennes des temps totaux de passation (s) en fonction des valeurs moyennes des durées de fixation (ms) pour chaque sujet dans la condition Contrôle. Les valeurs concernant la tâche de lecture (points bleus), de dénomination (points verts) et d'interférence (points rouges) sont reportées. Les coefficients de corrélation de Spearman (R_s) ainsi que les valeurs de p sont indiqués dans les couleurs respectives correspondantes.

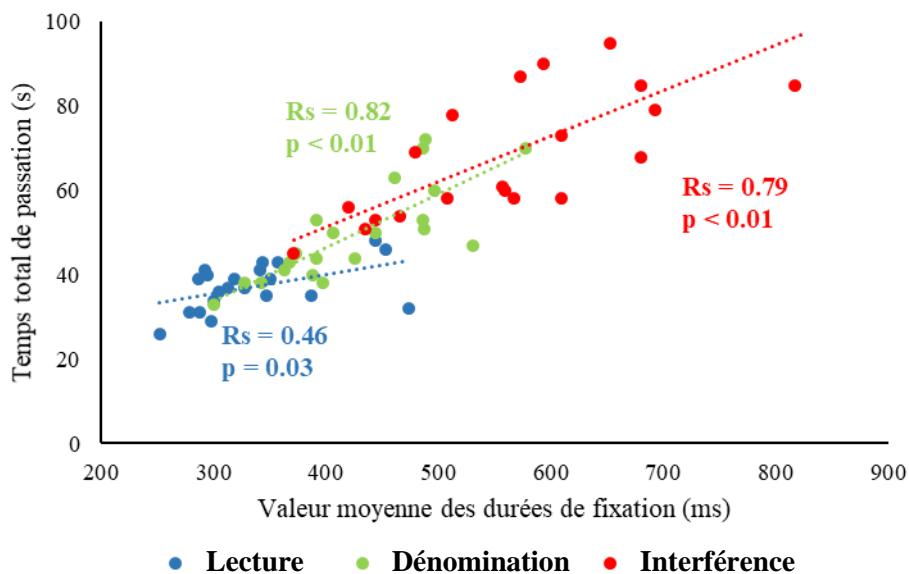


Figure 6B : Diagramme de dispersion des valeurs moyennes des temps totaux de passation (s) en fonction des valeurs moyennes des durées de fixation (ms) pour chaque sujet dans la condition Prismes. Les valeurs concernant la tâche de lecture (points bleus), de dénomination (points verts) et d'interférence (points rouges) sont reportées. Les coefficients de corrélation de Spearman (R_s) ainsi que les valeurs de p sont indiqués dans les couleurs respectives correspondantes.

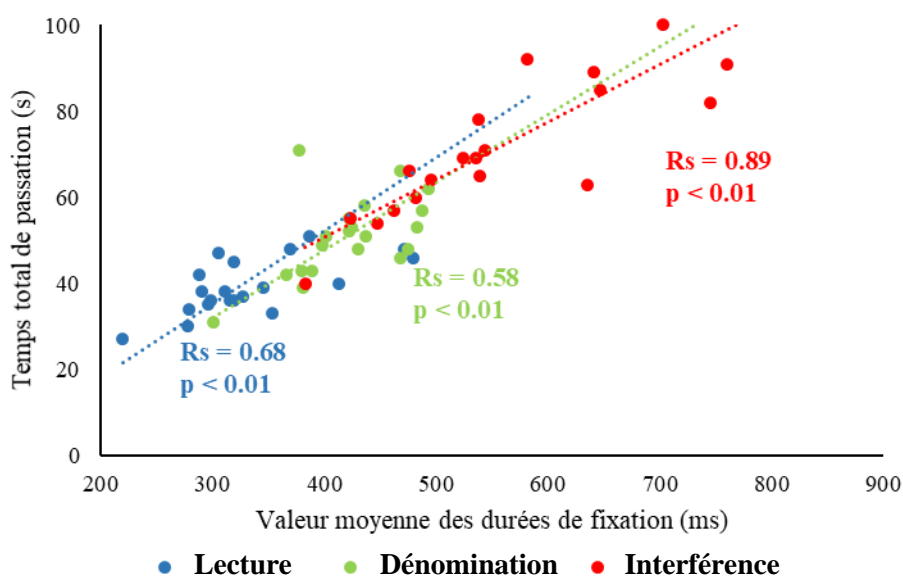


Figure 6C : Diagramme de dispersion des valeurs moyennes des temps totaux de passation (s) en fonction des valeurs moyennes des durées de fixation (ms) pour chaque sujet dans la condition Verres sphériques. Les valeurs concernant la tâche de lecture (points bleus), de dénomination (points verts) et d'interférence (points rouges) sont reportées. Les coefficients de corrélation de Spearman (R_s) ainsi que les valeurs de p sont indiqués dans les couleurs respectives correspondantes.

Ces corrélations significatives nous ont permis de réaliser les calculs usuellement effectués pour l'effet de couleur et l'effet d'interférence de Stroop avec les moyennes des durées de fixation, étant donné les résultats similaires. Par la suite, nous avons comparé tâche par tâche les temps totaux de passation et les moyennes des durées de fixation en fonction des conditions de réalisation.

Epreuve de lecture : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur le temps total de passation ($X^2(21, 2) = 12.34, p = 0.002$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Contrôle et Prismes ($36.90 \pm 6.13s$ contre $42.95 \pm 17.89s$; $Z = 2.98, p = 0.003$), ainsi qu'entre les conditions Prismes et Verres sphériques ($37.24 \pm 5.59s$ contre $42.95 \pm 17.89s$; $Z = 2.48, p = 0.013$). La tâche de lecture a réclamé statistiquement plus de temps pour être accomplie dans la condition Prismes en comparaison des autres conditions.

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur les moyennes des durées de fixation ($X^2(21, 2) = 2.00, p = 0.37$). Cependant, les résultats sont restés cohérents avec ceux réalisés utilisant le temps total de passation : les durées de fixation étaient en moyenne plus longues dans la condition Prismes ($345.23 \pm 83.24ms$) en comparaison de la condition Contrôle ($327.59 \pm 54.88m$) et Verres sphériques ($335.71 \pm 59.82ms$).

Epreuve de dénomination : Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur les temps totaux de passation ($X^2(21, 2) = 0.48, p = 0.79$). Il est cependant à noter que les résultats sont restés cohérents avec ceux réalisés pendant la tâche de lecture : la tâche a pris plus de temps pour être accomplie dans la condition Prismes ($54.10 \pm 17.24s$) en comparaison de la condition Contrôle ($50.95 \pm 9.81s$) et Verres sphériques ($49.67 \pm 11.46s$).

De façon similaire, le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur les moyennes des durées de fixation ($X^2(21, 2) = 0.38, p = 0.83$). Il est cependant aussi à noter que les résultats sont restés cohérents avec ceux réalisés pendant la tâche de lecture : les durées de fixation étaient en moyenne plus longues dans la condition Prismes ($440.38 \pm 96.29ms$) en comparaison de la condition Contrôle ($432.01 \pm 61.85ms$) et Verres sphériques ($425.30 \pm 71.79ms$).

Epreuve d'interférence : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur les temps totaux de passation ($X^2(21, 2) = 0.48, p = 0.79$). Il est cependant à noter que les résultats sont restés cohérents avec ceux réalisés pendant la tâche de lecture et de dénomination : la tâche a pris plus de temps pour être accomplie dans la condition Prismes ($76.67 \pm 24.31s$) en comparaison de la condition Contrôle ($68.19 \pm 13.44s$) et Verres sphériques ($70.05 \pm 16.89s$).

De façon similaire, le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur les moyennes des durées de fixation ($X^2(21, 2) = 4.57, p = 0.101$). Il est cependant aussi à noter que les résultats sont restés cohérents avec ceux réalisés pendant la tâche de lecture et de dénomination : les durées de fixation étaient en moyenne plus longues dans la condition Prismes ($594.46 \pm 158.96ms$) en comparaison de la condition Contrôle ($543.55 \pm 90.04ms$) et Verres sphériques ($574.22 \pm 122.32ms$).

Les valeurs moyennes et écart-types des temps totaux de passation et des moyennes des durées de fixation sont présentés en Figure 7A et 7B.

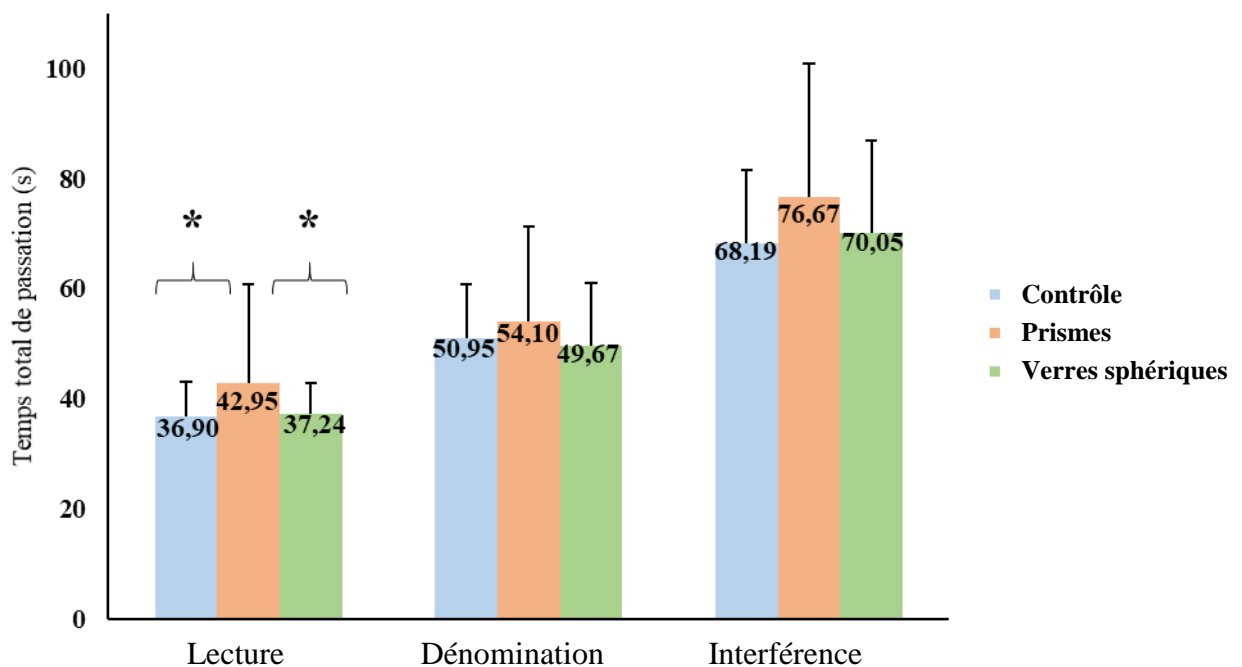


Figure 7A : Valeurs moyennes et ET concernant les temps totaux de passation (s) pour les tâches de lecture, de dénomination et d'interférence de Stroop dans les conditions Contrôle (bleu clair), Prismes (orange) et Verres sphériques (vert). Les différences significatives ($p < 0.05$) sont indiquées par un astérisque (*).

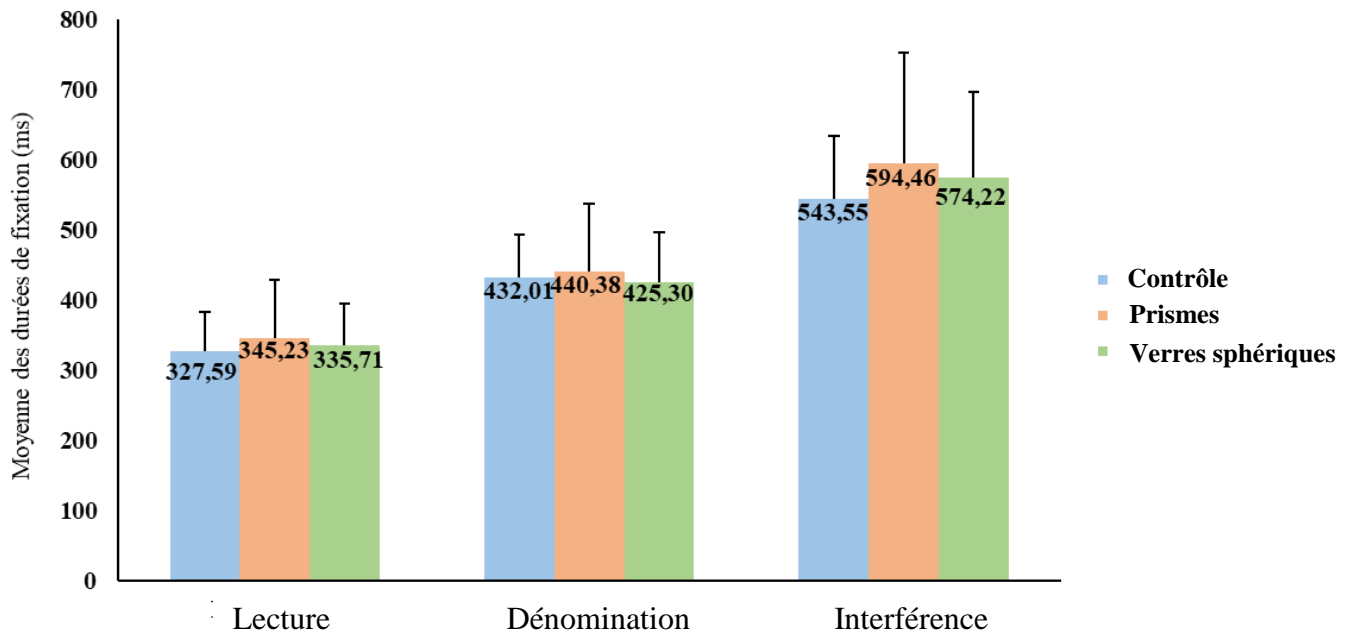


Figure 7B : Valeurs moyennes et ET concernant les durées de fixation (ms) pour les tâches de lecture, de dénomination et d'interférence de Stroop dans les conditions Contrôle (bleu clair), Prismes (orange) et Verres sphériques (vert).

Effet de couleur et effet d'interférence

Effet de couleur : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur l'effet de couleur ($X^2(21, 2) = 5.76, p = 0.056$). L'effet de couleur était en moyenne plus long dans la condition Contrôle ($14.05 \pm 7.83s$), en comparaison des conditions Prismes ($11.14 \pm 7.12s$) et Verres sphériques ($12.43 \pm 8.16s$), sans atteindre un seuil significatif.

De façon similaire, le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur l'effet de couleur calculé à l'aide des durées moyennes de fixation ($X^2(21, 2) = 3.43, p = 0.18$), ce qui confirme le résultat précédent : l'effet de couleur était en moyenne plus long dans la condition Contrôle ($104.12 \pm 55.73ms$), en comparaison des conditions Prismes ($95.16 \pm 58.36ms$) et Verres sphériques ($89.59 \pm 53.96ms$).

Effet d'interférence : le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur l'effet d'interférence ($X^2(21, 2) = 6.10, p = 0.047$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Contrôle et Prismes ($17.24 \pm 9.24s$ contre $22.57 \pm 11.48s$; $Z = 2.26, p = 0.023$). Les calculs tendent à donner des résultats similaires dans la comparaison entre condition Contrôle et condition

Verres sphériques (20.38 ± 11.80 s contre 17.24 ± 9.24 s), sans pour autant atteindre un seuil significatif ($Z = 1.59$, $p = 0.11$). Aucune différence significative n'a été retrouvée entre la condition Verres sphériques et la condition Prismes (20.38 ± 11.80 s contre 22.57 ± 11.48 s; $Z = 1.21$, $p = 0.23$).

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur l'effet d'interférence calculé à l'aide des moyennes des durées de fixation ($X^2(21, 2) = 12.09$, $p = 0.0023$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Contrôle et Prismes (111.54 ± 67.54 ms vs 154.08 ± 112.22 ms; $Z = 2.87$, $p = 0.004$) ainsi qu'entre les conditions Contrôle et Verres sphériques (111.54 ± 67.54 ms vs 148.92 ± 76.41 ms; $Z = 2.21$, $p = 0.027$), mais pas entre les conditions Verres sphériques et Prismes (148.92 ± 76.41 ms vs 154.08 ± 112.22 ms, $Z = 0.12$, $p = 0.90$).

Ces résultats, présentés en Figure 8A et 8B, montrent un effet d'interférence plus important dans la condition Prismes et dans la condition Verres sphériques en comparaison de la condition Contrôle. La différence est plus prononcée lorsque les durées de fixation sont utilisées pour le calcul.

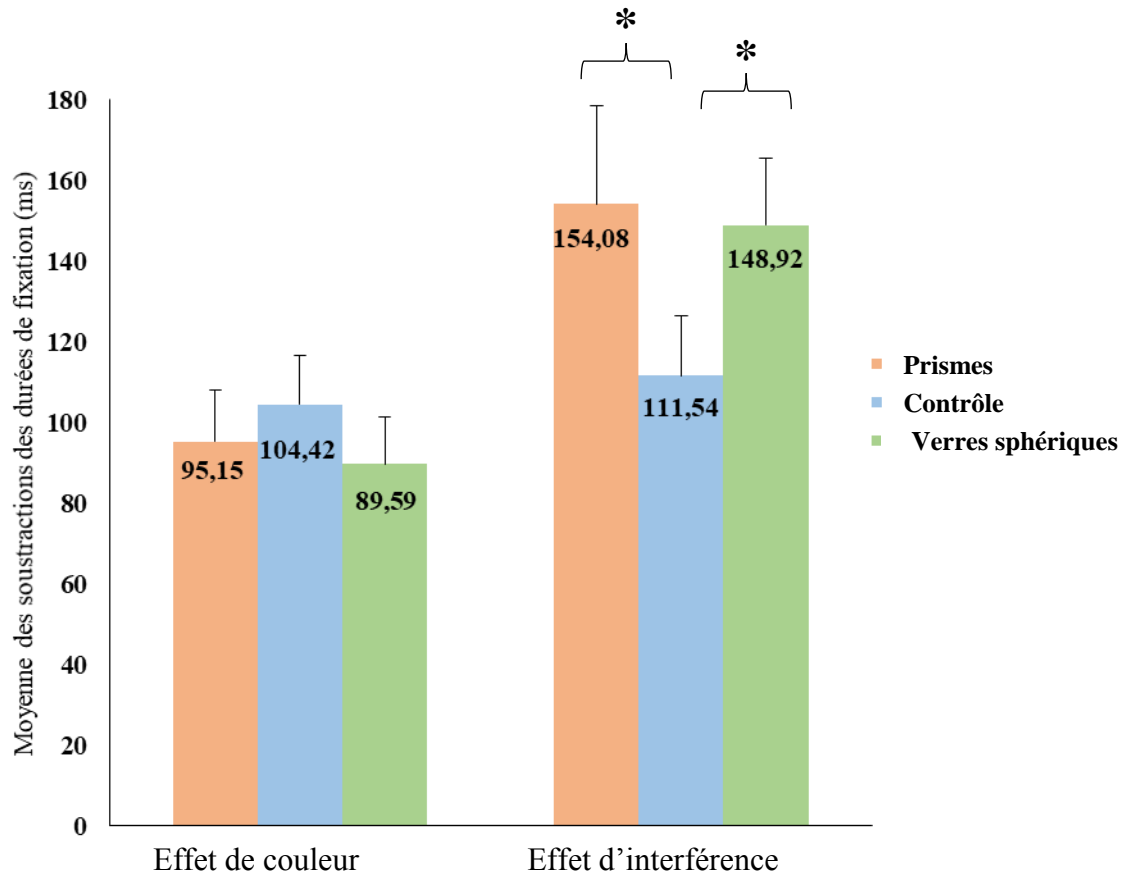


Figure 8A : Valeurs moyennes des effets de couleurs et d'interférence calculés à l'aide des durées moyennes de fixation pendant les différentes tâches du test de Stroop (ms). Les erreurs standards sont indiquées par les barres d'erreurs. Les valeurs sont données pour les conditions Contrôle (bleu clair), Prismes (orange) et Verres sphériques (vert). Les différences significatives ($p < 0.05$) sont indiquées à l'aide d'un astérisque (*).

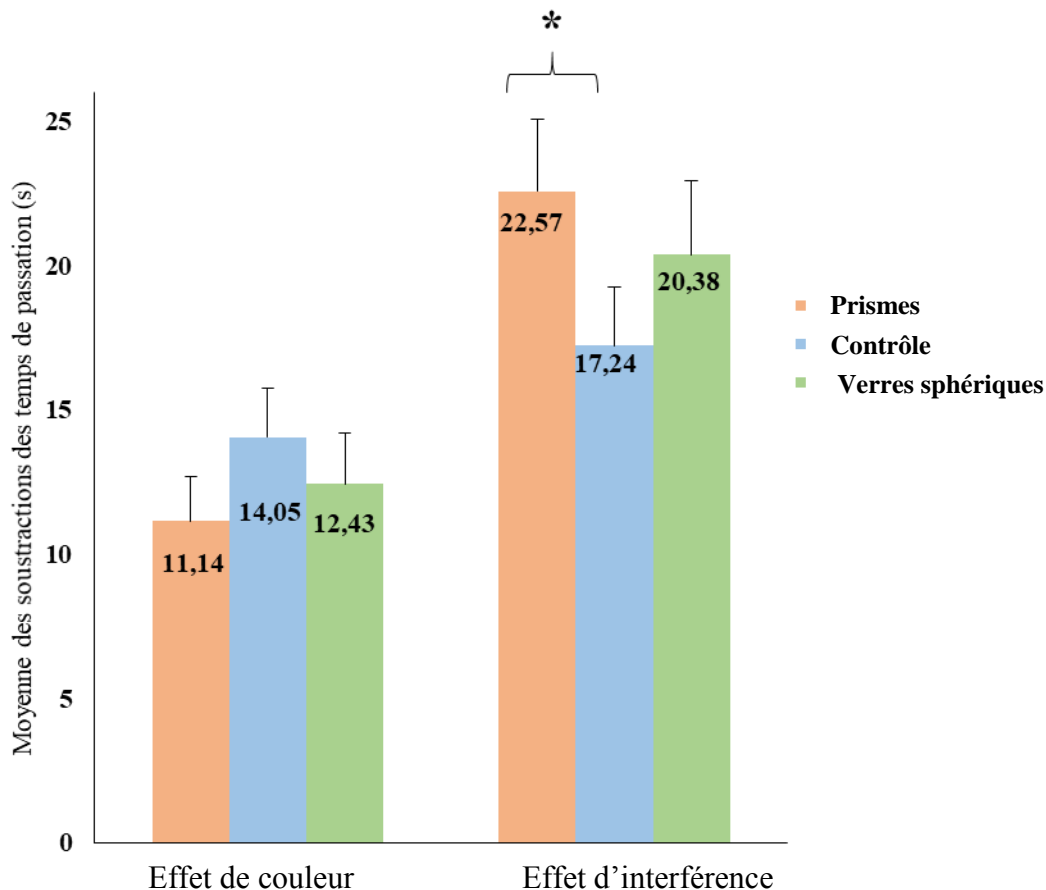


Figure 8B : Valeurs moyennes des effets de couleurs et d'interférence calculés à l'aide des durées totales de passation pendant les différentes tâches du test de Stroop en secondes (s). Les erreurs standards sont indiquées par les barres d'erreurs. Les valeurs sont données pour les conditions Contrôle (bleu clair), Prismes (orange) et Verres sphériques (vert). Les différences significatives ($p < 0.05$) sont indiquées à l'aide d'un astérisque (*).

Score d'erreur

Le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman n'a révélé aucun effet significatif des conditions sur le score d'erreur pendant la tâche de lecture ($X^2(21, 2) = 4.62, p = 0.09$) et pendant la tâche de dénomination ($X^2(21, 2) = 2.09, p = 0.35$). Concernant la tâche d'interférence, le test non-paramétrique de l'ANOVA de Friedman a révélé un effet significatif des conditions sur le score d'erreur ($X^2(21, 2) = 7.65, p < 0.022$). Le test de comparaison de Wilcoxon montre une différence significative entre les conditions Contrôle et Prismes (1.71 ± 1.42 contre 3.57 ± 3.20 ; $Z = 2.11, p = 0.035$). La comparaison entre conditions

Prismes et Verres sphériques tend à donner un résultat similaire (1.76 ± 1.79 vs 3.57 ± 3.20 ; $Z = 1.89$, $p = 0.059$) mais sans atteindre le seuil significatif. Il n'y avait pas de différence significative entre les conditions Verres sphériques et Contrôle (1.76 ± 1.79 vs 1.71 ± 1.42 ; $Z = 0.052$, $p = 0.96$).

Durée de fixation et paramètres des saccades et fixations

En utilisant l'entièreté des données, une analyse de régression multiple a été utilisée afin de déterminer si la durée de fixation pouvait être influencée par l'amplitude de la disconjugaison pendant la saccade précédente et par la disparité de fixation. Les résultats sont présentés en Table 4. Dans l'ensemble des tâches du test de Stroop et pour l'ensemble des conditions, l'amplitude de la disconjugaison intra-saccadique apparaît être un meilleur prédicteur de la durée de la fixation suivante : ces deux paramètres étaient positivement et significativement corrélés, en particulier pendant les tâches de lecture et d'interférence et dans les conditions Contrôle et Verres sphériques. Ici, plus la disconjugaison était importante, moins la coordination binoculaire pendant la saccade était bonne, plus la durée de fixation suivante était longue.

Tâche	Condition	Variables	B	SE B	β	SE β	p
<u>Lecture</u>	Contrôle	ALRM	R²= 0.0149, F(2,1399)=10.624, p<0.001*				
		Disconjugaison	0.109	0.027	86.35	21.53	<0.001*
		Disparité	-0.086	0.027	-36.34	11.49	0.002*
	Verres sphériques	ALRM	R²= 0.0094, F(2,1320)=6.2585 p<0.002*				
		Disconjugaison	0.095	0.028	78.99	23.34	<0.001*
		Disparité	-0.050	0.028	-18.79	10.53	0.07
	Prismes	ALRM	R²= 0.003, F(2,1322)=1.9742, p=0.1393				
		Disconjugaison	0.051	0.027	53.74	28.97	0.06
		Disparité	-0.02	0.027	-8.43	11.51	0.46
<u>Dénomination</u>	Contrôle	ALRM	R²= 0.001, F(2,1383)=0.964, p=0.382				
		Disconjugaison	0.033	0.027	41.99	35.08	0.23
		Disparité	-0.025	0.027	-17.22	18.88	0.36
	Verres sphériques	ALRM	R²= 0.0103, F(2,1369)=7.1373 p<0.001*				
		Disconjugaison	0.103	0.027	118.3	31.37	<0.001*
		Disparité	-0,012	0,027	-6,811	15,16	0,65
	Prismes	ALRM	R²= 0.0027, F(2,1340)=1.822 p=0.162				
		Disconjugaison	0.008	0.028	9.727	32.26	0.76
		Disparité	-0.053	0.028	-20.77	10.89	0.06
<u>Interférence</u>	Contrôle	ALRM	R²= 0.0192, F(2,1359)=13.283, p<0.0001*				
		Disconjugaison	0.126	0.028	220.6	48.50	<0.001*
		Disparité	0.036	0.028	28.21	21.61	0.19
	Verres sphériques	ALRM	R²= 0.0214, F(2,1345)=14.684 p<0.0001*				
		Disconjugaison	0.145	0.027	272.8	51.12	<0.001*
		Disparité	0.011	0.027	8.73	20.75	0.67
	Prismes	ALRM	R²= 0.0083, F(2,1379)=5.766 p<0.004*				
		Disconjugaison	0.018	0.027	34.41	51.49	0.50
		Disparité	0.087	0.027	58.18	18.05	0.001*

Table 4 : Résultats des analyses de régression multiples (ALRM) comme modèle pour prédire la durée des fixations en fonction de la valeur absolue de l'amplitude de la disconjugaison et de l'amplitude de la disparité de fixation. Les corrélations significatives ($p<0.05$) sont indiquées par un astérisque (*).

Discussion

Motricité binoculaire pendant le test de Stroop

Le test de Stroop est un test standardisé extrêmement utilisé dans la pratique clinique en ce qui concerne l'évaluation des performances concernant les fonctions exécutives cognitives (Kapoula et al., 2010 ; Fliss et al., 2016 ; Sobol et al., 2015). En effet, ce test fait majoritairement appel aux capacités d'inhibition et de maintien de l'attention, en particulier l'épreuve d'interférence. De plus, les réponses attendues pour ces tests sont initialement déclenchées par des stimulus visuels. A notre connaissance, les propriétés des mouvements oculaires pendant ces différentes tâches n'ont jusqu'ici jamais été étudiées.

La première question posée concernait justement le potentiel impact de la demande cognitive en lien avec la tâche sur le comportement visuo-moteur. La littérature nous montre déjà l'augmentation du temps de réponse pendant les épreuves de dénomination et d'interférence en comparaison de l'épreuve de lecture. Attribuée d'abord à la difficulté cognitive croissante (MacLeod, 1990), cette augmentation peut cependant se révéler être expliquée par différents facteurs et il était donc important d'éclairer le rôle respectif de chacun, étant donné l'implication du système visuel dans les 3 différentes tâches. Nous avons donc tout d'abord montré que le temps total de passation de chaque épreuve était avant tout déterminé par les durées des fixations réalisées pendant chaque tâche. Pendant chaque fixation, le système nerveux central procède à la récupération et l'analyse des données visuelles puis exécute la tâche demandée. Par exemple pour la tâche d'interférence, il lui faudra inhiber la lecture du mot pour donner à la place la couleur de l'encre dans laquelle il est écrit. Il n'est pas exclu que chacune des tâches ne soient pas entièrement réalisées pendant la période de fixation, et qu'elles puissent être terminées au début de la saccade suivante. Toutefois, nos résultats indiquent clairement que c'est bien pendant la fixation que la tâche cognitive est principalement réalisée. Plus la durée de fixation est importante, plus la tâche présente une demande cognitive élevée, comme par exemple pendant l'épreuve d'interférence en comparaison de l'épreuve de lecture. Ce constat est en lien direct avec la littérature portant sur la motricité binoculaire pendant la lecture : de plus longues durées de fixation sont le reflet d'une charge cognitive plus conséquente (Rayner, 1998 ; Rayner, 2009 ; Clifton et al., 2016 ; Henderson et al., 2015).

D'un point de vue moteur maintenant, une stratégie d'exploration singulière a été rapportée pendant les épreuves d'interférence, avec de très petites saccades enregistrées (<1.5°) plus

nombreuses, ce qui a entraîné des moyennes légèrement plus faibles concernant leur amplitude moyenne et l'augmentation du nombre de saccades de régression. Ce comportement est de notre point de vue constaté pour la première fois, et pourrait s'expliquer par le fait de vouloir inspecter chaque stimulus de l'épreuve d'interférence. Il est possible que ces micro-saccades, bien plus petites en taille que l'espace entre deux cibles, représentent une analyse minutieuse (Martinez-Conde et al., 2009) pendant cette tâche précisément, toutefois ce point nécessite des approfondissements. En dehors de cette caractéristique, nos résultats n'ont pas montré d'autres différences significatives concernant le comportement moteur des deux yeux quelle que soit la tâche et sa demande cognitive : la coordination des saccades, leur amplitude, la variabilité des disparités pendant les fixations ainsi que les coefficients de corrélation Disconjugaison/Glissade disconjuguée sont restés similaires.

En conclusion sur ce point, nous avons montré pour la première fois une forte modulation de la durée de fixation par la demande cognitive liée à la tâche : les mesures des moyennes des durées de fixation reflètent le degré de difficulté de l'épreuve. Par exemple, nommer la couleur de l'encre utilisée pendant la dénomination a entraîné des temps de fixation plus longs en comparaison de l'épreuve de lecture, beaucoup plus automatique. La tâche d'interférence demandant l'inhibition de la réponse de lecture au profit de la dénomination a provoqué l'augmentation de la durée de fixation, et ce en lien direct avec la stimulation de processus cognitifs de plus haut niveau.

Interactions entre cognition et conflit A-V

Le premier constat concernant l'incidence d'un conflit induit A-V sur les résultats du test de Stroop s'est observé au niveau de l'effet d'interférence, c'est-à-dire la mesure du coût temporel représenté par la tâche d'inhibition de la lecture au profit de la dénomination de la couleur. Les résultats les plus significatifs concernent le calcul réalisé à l'aide des durées de fixation moyennes, et indiquent que cet effet a été plus important lorsqu'un conflit A-V a été introduit, en particulier celui induit avec les prismes : en comparaison de la mesure réalisée pendant la condition Contrôle, l'effet d'interférence était allongé d'en moyenne 42 ms en conditions Prismes et 37 ms en condition Verres sphériques. De ce fait, ces résultats montrent l'importance de la bonne synergie A-V lorsque les fonctions cognitives de haut niveau sont sollicitées : sa déstabilisation, bien qu'elle n'entraîne pas obligatoirement de perte de qualité de vision, impacte le fonctionnement des processus cognitifs évalués pendant la tâche d'interférence de Stroop. En effet, ce coût temporel augmenté peut s'expliquer par le fait que

des ressources attentionnelles supplémentaires pour traiter la demande plus importante en vergence ou accommodation pendant les conditions de conflit A-V induites ont dû être mises en jeu : cette adaptation, pour maintenir la vision simple et nette, a entraîné une diminution globale des ressources à disposition pour la tâche cognitive d'interférence de Stroop. En d'autres termes, la tolérance au conflit A-V induit paraît plus basse pendant la tâche où la demande cognitive était la plus élevée, en témoignant l'augmentation des durées de fixation. La plausibilité de cette hypothèse se base avant tout sur le fait que les régions corticales impliquées dans les réponses en vergence et en accommodation (cortex visuel, lobes frontal et pariétal ; Jugde et al. 1986, Leigh and Zee 2006, Mays et al. 1995, Mays 1984, Gamlin 1999, Zhang et al. 1992) sont partiellement similaires à celles impliquées dans le contrôle cognitif (lobes frontal et pariétal, Milham et al. 2003, Aron 2007, Wang et al. 2010, Miller et al. 2011, Brass et al. 2005, Nachev et al. 2008, Banich et al. 2000, Barch et al. 2001). Plusieurs voies s'ouvrent pour expliquer la nature de ces interactions, et l'apport des données concernant les mouvements oculaires nous permet ici d'approfondir notre analyse.

En effet, d'un point de vue moteur, la condition Prismes est apparue beaucoup plus perturbatrice que la condition Verres sphériques. Cette dernière a provoqué une défocalisation de l'image en arrière de la rétine, forçant les sujets à accommoder pour récupérer une vision nette de la cible tout en maintenant l'angle de vergence identique, quand la condition Prismes a, elle, provoqué une disparité des images rétinienne, forçant les sujets à augmenter leur angle de vergence tout en maintenant leur positionnement accommodatif de référence. Bharadwaj et al. (2009) ont montré une plus grande tolérance du système visuel concernant la réponse accommodative en comparaison à la réponse de vergence. Ceci peut être en partie expliqué par l'existence de la profondeur de champ, sur laquelle le sujet peut s'appuyer pour moduler son positionnement d'accommodation en maintenant une vision nette de l'objet. En comparaison, les aires de Panum, qui permettent une plus grande flexibilité de fusion pour la vergence sont, de taille plus petite. Ainsi, la réponse de vergence qui permet la vision simple se doit d'être beaucoup plus précise que la réponse accommodative. Il est aussi possible que les circuits neuraux de l'accommodation interfèrent moins avec la cognition que ceux contrôlant les vergences de disparité. En d'autres termes, les disparités engendrées par les prismes ont plus d'impact sur le fonctionnement cognitif que le flou provoqué par les verres sphériques. Cette dernière hypothèse est fort plausible physiologiquement : une disparité entraînera un ajustement immédiat pour éviter la diplopie, alors qu'une image floue peut être plus aisément tolérée (Horwood et al., 2013). Ce plus fort impact dans la condition

prismatique a non seulement été retrouvé au sein des durées de fixation, mais aussi au niveau des scores d'erreurs pendant l'épreuve d'interférence, qui étaient plus importants en comparaison de ceux relevés dans les conditions Contrôle ou Verres sphériques. Un nombre plus important d'erreurs commises est un indicateur supplémentaire d'une plus forte incidence de la condition prismatique sur les ressources cognitives.

Adaptation lente accommodation-vergence

Dans la littérature optométrique, nous avons évoqué le concept de mécanismes d'adaptation lents réciproques vergence/accommodation évalués après l'induction de prismes ou de verres sphériques d'une durée de 15 minutes. Les résultats de notre étude avec mesure vidéo-oculographique montrent des dérèglements persistants au cours de l'expérience (durée de fixation allongée, disconjugaison plus importante). Cela signifie que ces mécanismes hypothétiques d'adaptation ne sont pas suffisants pour compenser efficacement le conflit initial A-V induit expérimentalement. Cette observation est importante théoriquement et en clinique. On voit ici l'intérêt des études objectives comme des mesures oculomotrices, et nous reviendrons sur ce point dans la discussion générale.

Impact du conflit A-V sur la coordination des saccades et les disparités de fixation

Basé sur le modèle de contrôle de la motricité binoculaire de Hering, le concept théorique que nous défendons implique que la coordination des saccades dépende de la qualité de la vergence et de sa synergie avec l'accommodation (Daniel et al., 2016). De ce fait, nous nous attendions à ce qu'un conflit A-V induit ait une incidence sur la disconjugaison des saccades. La rapidité des saccades a été très légèrement plus importante en condition Verres sphériques, et ce uniquement pendant les épreuves de lecture et de dénomination du test de Stroop. Ces premiers effets restent mineurs et nous n'avons pas d'explications à ce constat. Les autres paramètres ayant montré une modulation concernent directement la qualité de la coordination des saccades et du lien entre l'amplitude de la disconjugaison pendant celle-ci et sa correction pendant la fixation, évaluée via la glissade post-saccadique disconjuguée. Même si la valeur absolue de la disconjugaison est restée similaire dans les 3 conditions, il est apparu que sa valeur algébrique a été modulée en particulier dans la condition Prismes. En effet, une valeur significativement plus négative est retrouvée dans presque toutes les tâches du test de Stroop, attestant d'une disconjugaison plus divergente pendant les saccades. L'induction des prismes a donc agi d'une part sur la disconjugaison même de la saccade. D'autre part, la corrélation entre l'amplitude de cette disconjugaison et celle de la glissade disconjuguée a été plus faible

dans toutes les tâches du test en condition Prismes. De précédentes études ont montré des corrélations significatives entre ces deux paramètres (Vernet et al., 2009 ; Daniel et al., 2016), attestant de la capacité à réduire la disparité à l'origine liée à la disconjugaison intra-saccadique pendant la fixation. Ici, cette relation était de meilleure qualité pendant les conditions Contrôle et Verres sphériques, attestant de l'altération supplémentaire dans le domaine moteur provoquée par les prismes. Enfin, l'amplitude des disparités en début de fixation ainsi que leur variabilité ont été plus importantes en condition de conflit A-V : la condition Prismes a entraîné une variabilité plus importante pendant les tâches de lecture et de dénomination, alors que la disparité en début de fixation était d'une amplitude significativement plus grande en conditions Verres sphériques et Prismes pendant la tâche d'interférence. Les prismes ont donc eu un impact beaucoup plus conséquent sur la motricité binoculaire en général, à la fois pendant les phases de saccades et de fixation, en provoquant une dérégulation de la capacité du système nerveux central à contrôler les séquences intra et post-saccadiques. Nous défendons ici que cette condition particulière a été destructrice et que ceci a pu interférer plus lourdement avec les fonctions exécutives cognitives.

La condition Verres sphériques a eu moins d'impact sur la motricité binoculaire, mais il est cependant à noter qu'une incidence plus importante sur l'amplitude de la disparité de fixation pendant la tâche d'interférence de Stroop a été retrouvée. La fixation est une phase cruciale pendant laquelle la vision simple et nette est importante pour permettre la mise en place rapide des processus de lecture et cognitifs. Une disparité plus grande en début de fixation se doit d'être réduite rapidement afin d'éviter la diplopie. De ce fait, ajouté à une plus mauvaise coordination des saccades, nous émettons l'hypothèse qu'une disparité de fixation plus importante et plus variable puisse ralentir l'activation et diminuer l'efficacité des processus cognitifs évalués par le test de Stroop.

Première hypothèse d'un modèle séquentiel

En lien avec l'hypothèse motrice développée dans une précédente étude (Daniel et Kapoula, 2016), la détérioration de l'aspect moteur pendant les saccades et les fixations observée pendant les conditions de conflit A-V induit peut en partie expliquer les plus mauvais résultats pendant le test de Stroop concernant l'effet d'interférence. En effet, l'analyse de régression multiple utilisée sur l'ensemble des saccades réalisées montre une corrélation significative entre la disconjugaison et la durée de la fixation suivante dans plusieurs conditions et tâches de notre étude : plus la disconjugaison était importante, plus la durée de fixation était longue,

témoignant qu'une mauvaise coordination pendant la saccade pouvait impacter le temps de réponse immédiat en allongeant la phase de fixation. Cependant, cette relation était beaucoup moins retrouvée entre l'amplitude de la disparité de fixation et la durée de fixation. De plus, les coefficients de corrélation retrouvés étaient assez faibles, bien que significatifs. Ce dernier point nous amène à croire que la durée de fixation peut être légèrement influencée par la qualité de la coordination binoculaire pendant la saccade. Les résultats enregistrés pendant la condition Prismes apparaissent dès lors en contradiction avec ces dernières considérations. Cependant, la modulation importante du signe de la disconjugaison ainsi que la déstabilisation de la glissade post-saccadique peuvent expliquer les résultats trouvés pendant le test de Stroop de la même façon. Ainsi, une trop grande disconjugaison pendant la saccade impliquerait une plus grande disparité en début de fixation, qui devrait, elle, être corrigée rapidement pour permettre au système visuel sensoriel d'opérer promptement. Dans ce modèle séquentiel, un conflit A-V peut en conséquence entraîner un délai au niveau de l'activité des processus de cognition sans cependant interférer directement avec.

Toutefois, l'effet d'interférence mesuré a toujours été plus important dans les conditions de conflit A-V induit, et cet argument indique que l'interaction provoquée l'a été à un niveau plus global qu'un simple ralentissement du processus. De plus, il n'a pas été statistiquement retrouvé pendant les épreuves de lecture étudiée seule. L'hypothèse d'un modèle purement séquentiel d'interaction ne peut donc être l'unique explication. En effet, l'effet d'interférence est calculé via la soustraction des temps de passation ou des durées de fixation entre l'épreuve d'interférence et celle de dénomination. Si un délai est engendré par une déstabilisation motrice, il doit être retrouvé pendant les deux tâches et de ce fait disparaîtra ou sera fortement minimisé lors du calcul de l'effet d'interférence. De surcroît, de nombreuses études montrent que l'effet d'interférence peut être augmenté ou réduit en utilisant différents stimuli ou cibles (Davidson et al., 2003 ; MacLeod, 1998) ou simplement par le biais de l'entraînement (Protopapas et al., 2014). Ce dernier point indique que les processus cognitifs stimulés par la tâche de Stroop se mettent en place très rapidement et que les performances peuvent être modulées. De ce fait, l'hypothèse d'un modèle parallèle, faisant interagir en même temps processus visuels et cognitifs, est plus plausible pour expliquer la majorité de nos résultats.

Un modèle parallèle d'interaction

Les études de neuro-imagerie ont montré les multiples aires frontales et pariétales activées en parallèle pendant le test de Stroop, et ces aires sont similaires à celles impliquées dans le

contrôle de la vergence et de l'accommodation. L'induction d'un conflit A-V a possiblement forcé le système nerveux central à diviser les ressources cognitives entre la cognition et les réglages visuomoteurs, étant donné que ces deux processus sont activés en parallèle. L'argument majoritaire avancé ici reste la très faible déstabilisation de l'aspect moteur des saccades et des fixations pendant la condition Verres sphériques, où l'on constate tout de même un effet d'interférence plus long en comparaison de la condition Contrôle. Les processus visuels, à savoir le flou, ont donc pu interférer avec les processus cognitifs : maintenir une vision simple et nette des cibles pendant le conflit induit a perturbé l'habituel équilibre entre les réponses d'accommodation et de vergence. Les aires corticales impliquées dans ces réponses (cortex visuel, aires frontale et pariétale) ont donc été contraintes à déployer leur activité à la mise au point visuomotrice, entraînant une diminution globale de l'activité dédiée à la cognition. L'avenir des études avec enregistrements simultanés de l'accommodation par vidéo-oculographie présente un grand intérêt.

Conclusion

En conclusion, cette étude démontre que l'induction d'un conflit A-V, en particulier avec des prismes, entraîne une interférence avec les fonctions exécutives cognitives évaluées par le test de Stroop. Cette interférence est caractérisée par des durées de fixation plus longues, suggérant une réponse cognitive plus lente, ainsi que par un plus fort taux d'erreurs pendant la tâche. Le déséquilibre engendré par les prismes a aussi altéré la coordination binoculaire des saccades, avec une disconjugaison retrouvée plus négative, et une corrélation plus faible entre l'amplitude de cette même disconjugaison et celle de la glissade disconjuguée suivante. En conséquence, une disparité résiduelle plus importante et plus variable est apparue pendant les fixations et serait en partie à l'origine de l'interférence avec le contrôle cognitif. L'étude montre aussi une meilleure tolérance au conflit induit par des verres sphériques concaves, bien qu'une déstabilisation des processus cognitifs soit ici encore constatée, mais dans une moindre mesure. Cette étude a donc des implications à la fois théoriques et cliniques : (1) à un niveau théorique, les interactions entre un conflit A-V induit et la cognition restent d'intérêt, étant donné que les aires corticales impliquées dans leur contrôle sont similaires ; (2) à un niveau clinique, il est important de considérer que la tolérance à un déséquilibre A-V dépend de la difficulté cognitive de la tâche : la tolérance est en effet plus faible lorsqu'un haut degré cognitif est demandé, comme par exemple pendant la tâche d'interférence de Stroop. Les sujets présentant des dysfonctionnements de la vergence ou de l'accommodation ont fréquemment des rapports AC/A et CA/C hors normes (Lara et al., 2001 ; Porcar & Martinez-

Palomera, 1997). En conséquence, l'évaluation des capacités visuelles pendant des tâches réclamant une réponse cognitive importante et nécessitant un maintien soutenu de l'attention peut s'avérer intéressante, en particulier chez ces populations spécifiques, afin d'observer plus aisément de possibles carences et d'évaluer l'efficacité d'un éventuel traitement.

Valorisation : cette étude a fait l'objet d'un article soumis à *Journal of Vision*. Les résultats ont été présentés au congrès du SILMO (SILMO Academy) en Septembre 2015.

ETUDE 3

Bénéfices engendrés par la réhabilitation de la vergence pendant la lecture

Introduction

La tâche visuelle de lecture requiert une coordination binoculaire de qualité. Afin de fixer chaque mot les uns après les autres, les yeux doivent exécuter des saccades majoritairement horizontales tout en maintenant un angle de vergence stable, la lecture étant essentiellement une activité de vision proche nécessitant une fixation binoculaire précise des mots. Si la coordination des saccades s'avère mauvaise, elle pourra entraîner des problèmes de disparité pendant les phases de fixation (Evans, 2002, Jainta et al., 2010 ; Kliegl et al., 2006 ; Nuthmann and Kliegl, 2009 ; Blythe et al., 2006 ; Liversedge et al., 2006).

La qualité de cette coordination binoculaire dépend du contrôle de la vergence et de la neuroplasticité. Elle est caractérisée par la mesure de la disconjugaison pendant et après la saccade, i.e. la différence d'amplitude de mouvement entre les deux yeux. Les saccades chez les adultes sains ne sont cependant pas toujours parfaitement coordonnées (Kapoula, 1986 ; Collewijn et al., 1988). En effet, à cause de l'asymétrie existante au niveau de l'anatomie particulière des différents muscles et innervations impliqués, une commande centrale de saccade concernant les deux yeux (en accord avec la loi de Hering) peut résulter dans une saccade légèrement plus importante de l'œil abducteur que de l'œil adducteur (voir Collewijn et al., 1988).

Le développement de la coordination binoculaire apparaît guidé par l'expérience visuelle et basé sur la neuroplasticité/maturation : les premières preuves furent présentées par Fioravanti et al. (1995), qui rapportèrent que la coordination binoculaire pendant la saccade était mauvaise chez les enfants mais s'amélioraient avec l'âge ; Yang et Kapoula (2003) montrèrent ensuite que l'amplitude de disconjugaison pendant les saccades était beaucoup plus variable chez les enfants que chez les adultes ; des résultats similaires ont enfin été observés pendant une tâche de lecture (Blythe et al., 2006) et viennent ici encore corroborer cette affirmation. Yang et Kapoula (2003) ont émis l'hypothèse que le système nerveux central apprenait à déclencher une commande rapide de vergence pendant une saccade aidant à réduire l'asymétrie abduction/adduction. Cependant, en vision proche, lorsque les yeux

doivent maintenir le même angle de vergence, apprendre à produire une convergence intra-saccadique est plus difficile.

Dans ce contexte théorique, nous posons comme hypothèse que la rééducation de la vergence et de l'accommodation chez des personnes présentant un dysfonctionnement devrait entraîner chez eux une amélioration dans la coordination des saccades. En effet, la rééducation orthoptique n'entraîne pas seulement une augmentation des capacités en vergence et une réduction des symptômes relatifs à un dysfonctionnement (Scheiman et al. 2009, Cooper et al. 2009, Griffin 1987, Von Noorden 2002), elle permet aussi d'améliorer la coordination pendant et après la saccade comme l'avait montré Bucci et al. (2006) chez des enfants souffrant de vertiges et présentant des troubles de la vergence. Gaertner et al. (2013) ont aussi mesuré objectivement les bénéfices apportés par un entraînement orthoptique traditionnel chez des enfants : un gain des performances de vergence et une diminution significative de la disjonction des saccades pendant la lecture sont conjointement rapportés, comparant les données avant et après la rééducation. Cependant, les textes utilisés étaient assez courts (parfois seulement une phrase), en conséquence la vitesse de lecture et la qualité de la coordination sur une durée plus longue ne pouvaient pas être appréciées avec précision.

Les sujets diagnostiqués en insuffisance de convergence (IC) et rééduqués ont fait l'objet des dernières études d'Alvarez et al. (2010, 2013, 2014). Les résultats montrèrent tout d'abord que, préalablement à toute rééducation, ces sujets présentaient des disparités entre l'œil droit et l'œil gauche au niveau de leurs pics de vitesse pendant des mouvements de vergence, en comparaison à des sujets sains. Une autre de leurs études réalisée grâce à la technologie IRMf a révélé que les régions corticales telles que le champ oculomoteur frontal (FEF), le cortex pariétal postérieur (PPC) et le vermis du cervelet (CV), toutes trois impliquées dans la programmation des mouvements de vergence, voyaient leur activité significativement réduite chez les personnes diagnostiquées en insuffisance de convergence en comparaison des sujets sains. Les résultats de ces différentes études font état de deux points importants relatifs aux améliorations liées à leur rééducation des vergences : d'une part leurs pics de vitesse dans les mouvements de vergence sont devenus significativement plus symétriques qu'avant la rééducation, et d'autre part cette amélioration était corrélée à une augmentation de l'activité cérébrale des zones FEF, PPC et CV.

L'objectif de la présente étude est ici de mesurer les améliorations qu'une rééducation de la vergence dans le plan médian peut apporter dans la qualité de la coordination binoculaire des saccades en lecture chez de jeunes adultes diagnostiqués avec des troubles de vergence. L'entraînement orthoptique est basé d'habitude sur des exercices empiriques (comme par exemple avec un stylo lampe ou une barre à prisme) qui induisent souvent un conflit entre l'accommodation et la vergence, et ceux-ci peuvent beaucoup varier d'un clinicien à l'autre. L'intérêt majeur de cette étude est cette fois que la rééducation a été accomplie à l'aide d'une méthode basée sur la recherche (protocole « vergence double step » avec l'appareil REMOBI, voir Fig. 2 ; Kapoula et al., 2016) : un protocole répétable, réalisé dans l'espace tridimensionnel et n'induisant aucune rivalité accommodation/vergence, conçu avec précision concernant les restrictions de temps et d'espace. Les sujets ont ainsi accompli un total d'environ 2200 mouvements de vergence répartis sur 5 séances de 35 minutes chacune.

Dusek et al. (2011) ont montré pour leur part des augmentations significatives de la vitesse de lecture chez des enfants diagnostiqués en IC : les enfants rééduqués présentaient une amélioration significative de leur vitesse de lecture en comparaison de ceux qui n'avaient pas suivi de rééducation. Même s'il est probable que cette augmentation ait pu être induite par une diminution des durées de chaque fixation, cela n'a cependant pas été examiné objectivement.

Le deuxième objectif de cette étude sera donc d'évaluer l'éventuelle incidence de la réhabilitation de la vergence sur les autres paramètres relatifs à la tâche motrice de lecture, comme par exemple les durées de fixation. En effet, cette mesure est en lien direct avec le traitement de l'information visuelle et témoigne de la rapidité avec laquelle sont faits les processus cognitifs. Améliorer les capacités en convergence pourrait aussi améliorer les fonctions exécutives cognitives d'un sujet, un lien entre dysfonctionnement des vergences et capacités d'inhibition ayant déjà été démontré (Daniel et Kapoula, 2016).

Enfin, le troisième objectif de cette étude est de se focaliser sur les possibles effets à courts termes et effets à long terme d'un entraînement des vergences sur la qualité des saccades et fixations en lecture. Les effets à court terme ont déjà été montrés (Eggert and Kapoula 1995, Kapoula et al. 1995) concernant une adaptation de la disconjugation intra-saccadique suite à l'induction d'un verre grossissant (10%) devant un œil. Dans la présente étude, nous étudierons si une séance de seulement 35 minutes d'entraînement des vergences peut avoir une incidence immédiate sur la qualité de la coordination binoculaire des saccades et des

fixations pendant la lecture. Nous appellerons « effets à court terme » les évolutions retrouvées après une unique séance de rééducation, c'est-à-dire entre les deux mesures de lecture réalisées avant et après la même séance. Nous appellerons « effets à long terme » les évolutions retrouvées après l'entière de la rééducation, c'est-à-dire entre les mesures réalisées avant et après le programme de rééducation complet de 5 sessions hebdomadaires de 35 minutes chacune.

Méthode

Sujets

Neufs étudiants (4 hommes, 5 femmes, âgés en moyenne de 25.7 ± 9.7) et diagnostiqués avec un désordre de la vergence après un examen orthoptique (pour plus de détails, voir Kapoula et al., 2016), présentant un score de symptomatologie élevé (≥ 20 sur l'échelle CISS, Rouse et al., 2004) et majoritairement recrutés au *Lycée Fresnel* de Paris, ont suivi une rééducation de la vergence. Les séances d'entraînement ont été réalisées une fois par semaine sur une période de 5 semaines (pour plus de détails, voir Kpoula et al., 2016). Nous avons aussi testé 3 sujets contrôle, ne présentant pas de désordres de la vergence (2 hommes et 1 femme, moyenne d'âge 21 ± 1 ans) uniquement pour les tests de lecture.

Bilan orthoptique

Un bilan orthoptique a été réalisé avant la rééducation de la vergence, à un jour différent de la première séance de rééducation. Un second bilan a eu lieu un mois après la dernière séance de rééducation, afin d'évaluer l'évolution de certaines mesures à la suite du traitement. Le sujet n°4 n'était pas présent lors de ce dernier bilan. Les principaux résultats sont présentés sur la Table 1.

Sujet	PPC		Réserve fusionnelle en divergence			Réserve fusionnelle en convergence		Score CISS	
	Avant	Après		Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
1	5	5	Loin	4	4	10	16	21	19
			Proche	10	10	30	30		
2	8	5	Loin	16	16	18	25	30	13
			Proche	18	18	35	35		
3	6	5	Loin	8	8	10	40	35	4
			Proche	12	12	16	40		
4	15	-	Loin	6	-	6	-	34	17
			Proche	10	-	12	-		
5	5	3	Loin	4	4	14	25	32	21
			Proche	6	6	30	40		
6	5	6	Loin	4	6	16	16	13	9
			Proche	8	8	20	25		
7	5	5	Loin	6	4	14	40	32	31
			Proche	14	12	25	25		
8	5	5	Loin	6	10	20	20	26	12
			Proche	12	14	25	25		
9	10	5	Loin	6	6	8	20	25	12
			Proche	6	14	12	18		
Moyenne	7	5	Loin	7	7	13	25	27,6	15,3
(±ET)	(±3)	(±1)		(±4)	(±4)	(±5)	(±10)	(±7,1)	(±7,8)
			Proche	11	12	23	30		
				(±4)	(±4)	(±8)	(±8)		

Table 1 : Récapitulatif des résultats des bilans orthoptiques réalisés avant et après les séances de réhabilitation de la vergence. Les mesures du Punctum Proximum de Convergence (PPC, en cm), des réserves fusionnelles en convergence et en divergence réalisées à distance lointaine et proche (5m et 40cm, en dioptries prismatiques, Δ) et le score CISS de symptomatologie sont indiqués pour chaque participant.

Tests de lecture, tests de vergence et protocole de réhabilitation de la vergence

Quatre tests de lecture, à l'aide du test étalonné de l'*Alouette*, ont été réalisés au total, les deux premiers respectivement avant et après la première séance de rééducation, les deux derniers respectivement avant et après la cinquième séance de rééducation. Chacun de ces tests de lecture a été suivi d'un test de vergence, comme décrit dans la méthodologie générale. La Figure 1 montre l'agencement des différents tests dans le protocole de l'étude. Pendant toutes ces épreuves, les mouvements oculaires ont été enregistrés grâce à l'appareil EyeSeeCam (voir méthodologie générale).

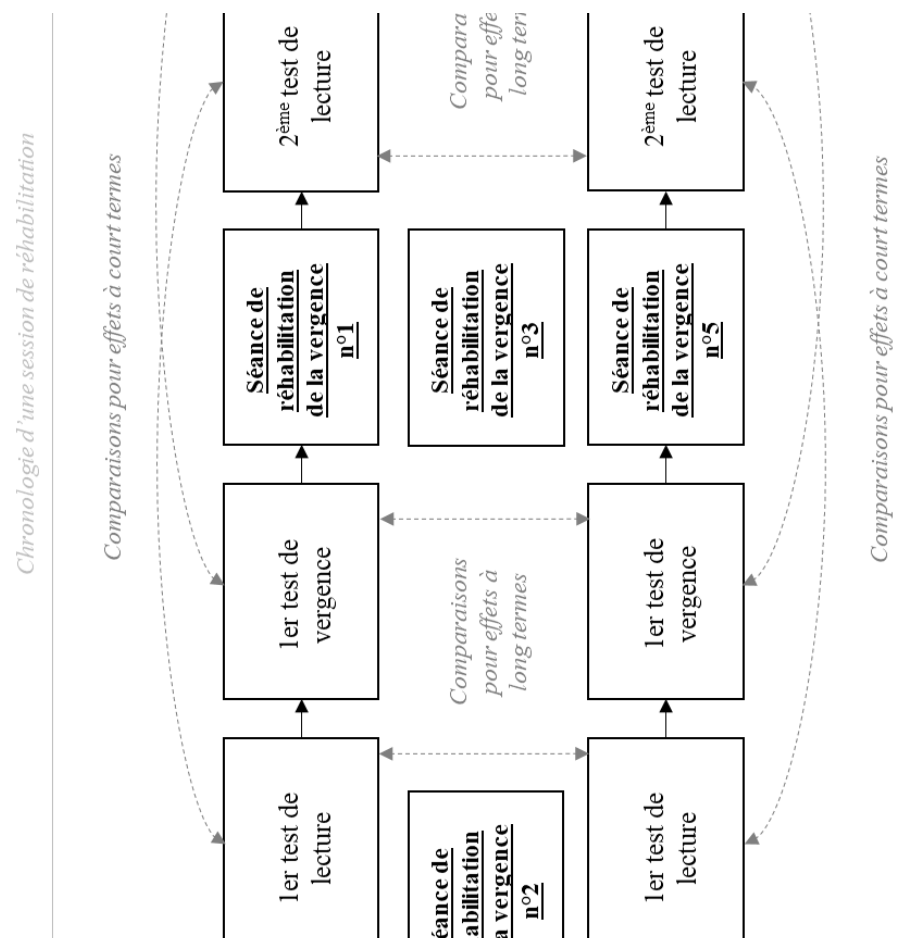


Figure 1 : Chronologie des différents tests réalisés avant et après la rééducation de la vergence

Test de lecture : il a été demandé à chaque participant de lire à voix basse le texte entier et de lever le doigt pour signaler quand ceci était terminé. Nous avons utilisé le test de *L'Alouette* (Lefavrais, 1967 ; Debray, 1972) contenant 265 mots et initialement conçu pour déterminer l'âge lexique d'un enfant et dépister une éventuelle dyslexie. Ce test n'évalue cependant pas la compréhension ou la mémorisation. Il est en effet composé de nombreux mots peu fréquemment utilisés dans la littérature, et les phrases mises bout à bout n'ont pas de

signification propre. Ainsi, il est très difficile pour le lecteur d'y trouver un quelque sens et de faire des connections avec les phrases suivantes. Mémorisation et anticipation de certains mots sont donc rendues très complexes, et ceci force le sujet à rester attentif à sa lecture et à lire tous les mots. Il est en général rapporté comme étrange (Vernet et al., 2009), mais cette structure a permis de pouvoir le répéter plusieurs fois en évitant un maximum un effet d'entraînement trop important, l'absence de sens du texte rendant la mémorisation difficile. Le test était imprimé en police Courier et taille 12, chaque lettre était vue sous une taille angulaire de 0.3° à 40cm.

REMOBI, test de vergence et réhabilitation : cette étude a été menée en parallèle de la rééducation orthoptique de plusieurs des étudiants participants. Afin de réaliser une réhabilitation des mouvements de vergence chez les sujets présentant des dysfonctionnements, nous avons opté pour l'utilisation du REMOBI (Brevet US 8851669), tablette horizontale de forme trapézoïde, équipée d'éléments visuo-acoustiques (diodes et buzzers) et de logiciels embarqués. Pouvant réaliser les paradigmes Gap et Overlap, et permettant de présenter des cibles lumineuses entre des distances de 1.50m et 20cm dans le plan médian comme à des excentricités de 5, 10, 15 et 20° à droite et à gauche, nous nous sommes plus particulièrement attardés dans le cadre de notre travail sur les résultats de paradigmes Overlap dans le plan médian pour des mouvements de vergence pure.

Test de vergence : les mouvements de vergence ont particulièrement été observés et analysés dans un paradigme particulier : une diode de fixation était présentée dans le plan médian à 40cm du sujet pendant 2000ms, puis une deuxième diode apparaissait 1200 à 1800ms après le début de la présentation de la première, soit située à 1.50m du sujet, soit située à 20cm du sujet. Dans le premier cas, un mouvement de divergence devait être accompli pour aller fixer une diode plus éloignée. Dans le deuxième cas, un mouvement de convergence devait être accompli pour aller fixer une diode plus rapprochée (voir Fig. 2).

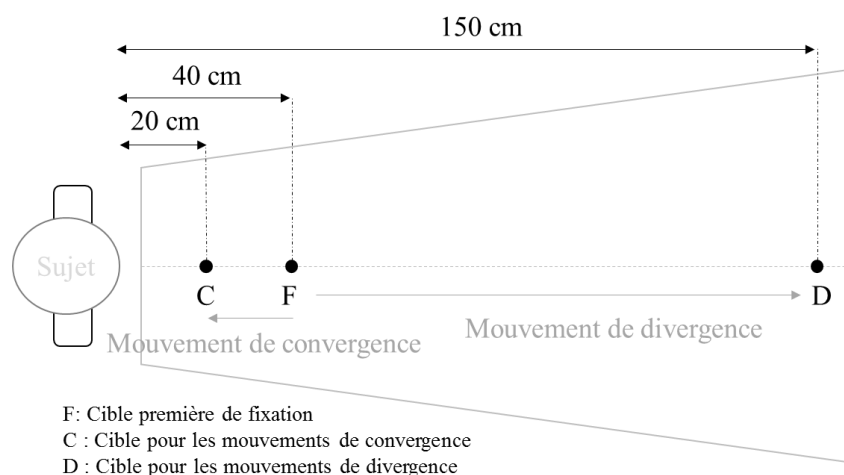


Fig 2 : Tests de vergence réalisés avec le REMOBI

Sur un test entier de 2.5 minutes, les sujets réalisaient ainsi aléatoirement 40 mouvements, 20 mouvements de convergence et 20 mouvements de divergence.

Protocole de réhabilitation de la vergence : concernant le programme de réhabilitation de la vergence, nous avons utilisé le protocole Vergence double-step (Vd-s), longuement détaillé dans l'étude de Kapoula et al. (2016), lors de chacune des séances réalisées par les étudiants. Lors de ce protocole, le sujet doit effectuer un mouvement de vergence en direction d'une première cible. Cette cible n'est cependant présentée qu'un temps très court et est remplacée par une seconde cible, encore plus proche pour l'entraînement en convergence et encore plus lointaine pour l'entraînement en divergence, forçant le sujet à reprogrammer rapidement le mouvement initial. Les résultats présentés par Takagi et al. (2001) plaident pour l'existence d'une neuroplasticité oculomotrice centrale, car retrouvant une adaptation du mouvement comme décrit pour les saccades, mais cette fois avec des vergences. Le protocole expérimenté ici nous permettait donc d'approfondir cette notion et d'observer si grâce à un entraînement de ce type, la préparation d'un mouvement oculaire pouvait être améliorée via la neuroplasticité. Les résultats apportés par Kapoula et al. (2016) ont à la fois confirmé cette hypothèse et permis de valider l'utilité clinique du REMOBI et du Vd-s dans la réhabilitation des mouvements de vergence.

Pour l'entraînement aux mouvements de convergence, une première diode apparaissait à 1.50m pendant 1600ms. Elle était immédiatement suivie par l'apparition d'une seconde, aléatoirement située à 99cm ou à 26cm et dont le temps de présentation était de 200ms. Une

troisième diode, plus proche que la seconde et respectivement placée à 95cm ou 23cm, dépendant de la position de la deuxième, était alors présentée pendant 1300ms (voir Fig. 3A).

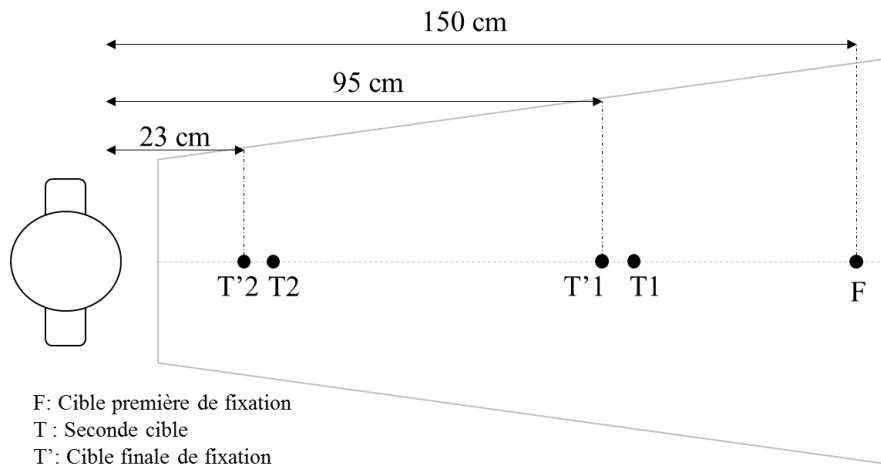


Fig. 3A : Protocole de réhabilitation double-step pour les mouvements de convergence

Pour l'entraînement aux mouvements de divergence, une première diode apparaissait à 20cm pendant 1600ms. Elle était immédiatement suivie par l'apparition d'une seconde, aléatoirement située à 34cm ou à 57cm et dont le temps de présentation était de 200ms. Une troisième diode, plus éloignée que la seconde et respectivement placée à 40cm ou 90cm, dépendant de la position de la deuxième, était alors présentée pendant 1300ms (voir Fig. 3B).

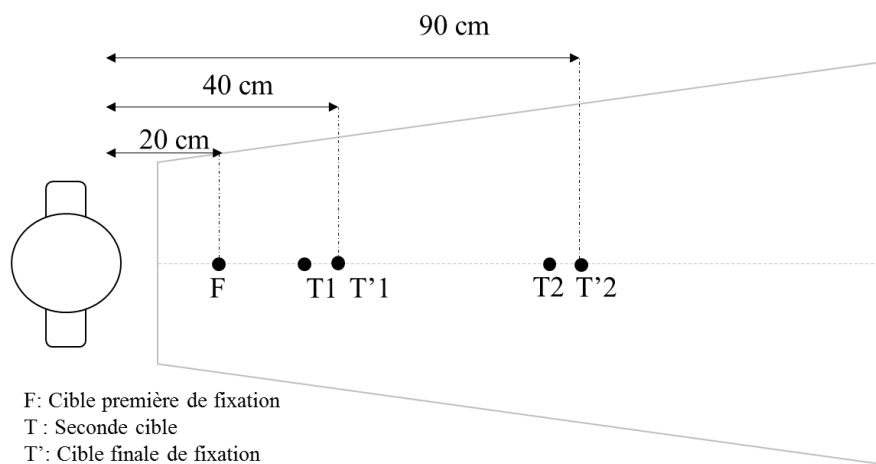


Fig. 3B : Protocole de réhabilitation double-step pour les mouvements de divergence

Chaque block d'entraînement en convergence et en divergence durait entre 2 et 3 minutes, et représentait un total de 40 mouvements effectués chacun. Chaque séance de réhabilitation durait 35 minutes effectives, avec à l'intérieur une succession de 11 blocks de ce type

entrecoupés de pauses : 6 en convergence et 5 en divergence. Chaque participant a effectué 5 séances de réhabilitation, à raison d'une par semaine sur 5 semaines.

Analyse des données de lecture

Pour 8 sujets, 80 à 90% des données ont pu être utilisées pour l'analyse statistique, 10 à 20% des données ont été rejetées, du fait des clignements et de la perte de certains signaux pendant les tests. Pour 1 sujet sur un test de lecture, 40% des saccades ont dû être rejetées du fait d'une perte de signal pendant l'enregistrement.

Analyse des tests de vergence

Le paramètre le plus important concernant l'analyse des tests de vergence concernait l'amplitude du mouvement réalisée, exprimée par la valeur du gain et représentant l'amplitude de la réponse de vergence objectivement mesurée en comparaison de l'angle de vergence attendu (calculé avec la distance des diodes et l'écart inter-pupillaire, voir Fig. 4). Il est important de noter que la plupart des personnes diagnostiquées avec un désordre de la vergence montraient des anomalies importantes concernant les mouvements de convergence et/ou de divergence concernant le gain en comparaison des sujets contrôle (Kapoula et al., 2016). Pour tous les sujets, 75% à 100% des données ont pu être inclus dans les statistiques. Plus précisément, $11.6 \pm 8\%$ ont été rejetées, majoritairement à cause des clignements pendant les tests et les pertes de signal, et de façon similaire pour la convergence et la divergence. Ce chiffre est très proche des taux de rejets déjà observés concernant des études ciblant de jeunes adultes (Lang et al., 2014).

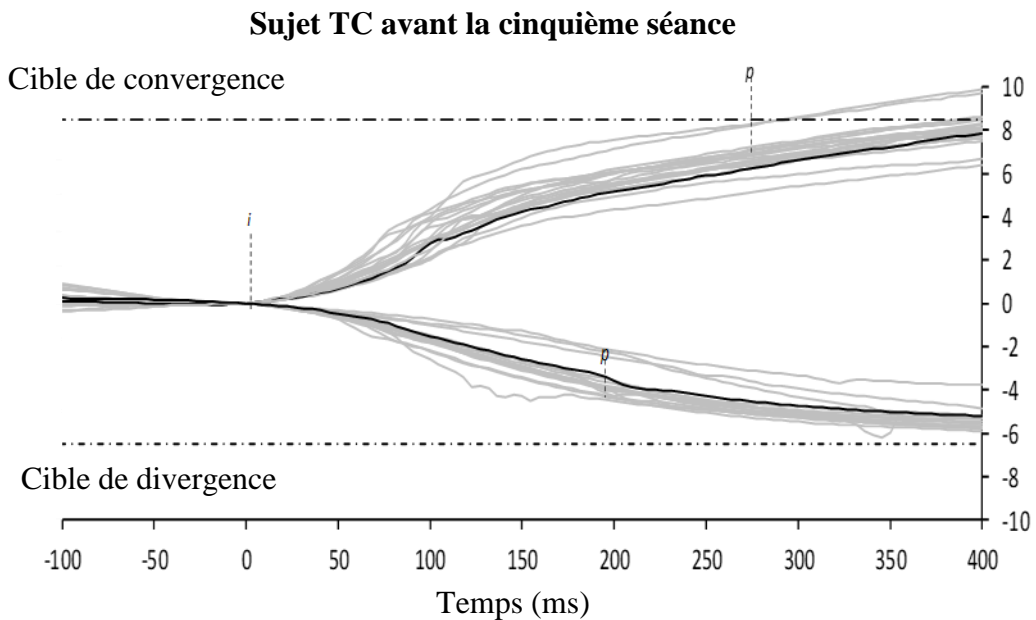
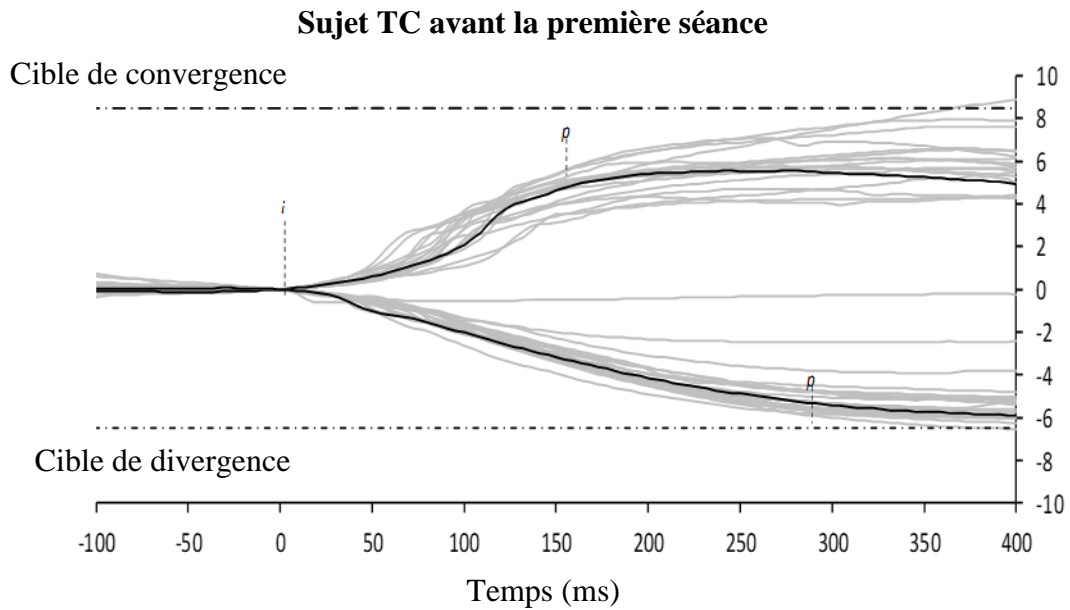


Figure 4 : Test de vergence : traces des signaux disconjugués (sujet TC) pendant les tests de vergence avant la première (figure du haut) et avant la cinquième (figure du bas) séance de réhabilitation de la vergence. i et p indiquent respectivement le début et la fin du mouvement de vergence tracé en noir, la limite temporelle indiquant lorsque la vitesse du mouvement augmentait au dessus ou chutait en dessous de $5^\circ/s$. La superposition de chaque mouvement de convergence et de divergence est tracée en gris.

Résultats

Effets de la réhabilitation de la vergence sur les mesures cliniques

Le protocole de réhabilitation de la vergence a montré plusieurs évolutions significatives concernant les mesures orthoptiques et le score de symptomatologie (CISS, voir Table 1) : les réserves fusionnelles en convergence ont augmenté, la mesure du PPC a diminué, tout comme le score de symptomatologie. Les différences significatives ont été retrouvées au niveau des réserves fusionnelles en convergence à distance lointaine (13 ± 5 Dioptrie Prismatique (Δ) avant la rééducation contre $25 \pm 10 \Delta$ après la rééducation, $Z=2.37$, $p<0.02$) ainsi qu'au niveau du score CISS (27.6 ± 7.1 avant contre 15.3 ± 7.8 après, $Z=2.67$, $p<0.01$).

Tests de vergence

Les valeurs moyennes et les écart-types du gain et des coefficients de variabilité pour les mouvements de convergence et de divergence sont indiqués sur la Table 2.

	Premier test Première séance	Deuxième test Première séance	Premier test Cinquième séance	Deuxième test Cinquième séance
Convergence				
Gain (Moy.)	0.68* (± 0.2)	0.66* (± 0.2)	0.92* (± 0.2)	0.94* (± 0.17)
Coef. de variabilité (Moy.)	37 (± 23)	29* (± 22)	14 (± 6)	13* (± 6)
Divergence				
Gain (Moy.)	0.57 (± 0.22)	0.69* (± 0.13)	0.75⁺ (± 0.11)	0.81⁺* (± 0.14)
Coef. de variabilité (Moy.)	36* (± 30)	17* (± 10)	14* (± 7)	13* (± 11)

* Effet significatif de la réhabilitation à long terme (calculé entre les premiers ou les deuxièmes tests de la première et de la dernière séance)

⁺ Effet significatif de la réhabilitation à court terme (calculé entre le premier et le deuxième test de chaque séance)

Table 2 : Moyennes et écart-types (entre parenthèses) des valeurs de Gain et de Variabilité concernant les mouvements de convergence et de divergence enregistrés objectivement pendant les tests de vergence pour chacune des séances. Les différences significatives sont indiquées en gras et par un astérisque ($p<0.05$, *).

Effets à court terme

Pendant la première séance de réhabilitation, aucun effet à court terme sur les mouvements de convergence ou de divergence n'a été retrouvé ($p > 0.05$). Cependant, une différence significative a été révélée pendant la cinquième séance de réhabilitation, c'est-à-dire à la fin du programme complet, concernant la valeur du gain en divergence : le gain a augmenté, attestant d'une précision améliorée dans les mouvements de divergence (0.75 ± 0.11 contre 0.81 ± 0.14 , $Z=2.43$, $p = 0.015$).

Effets à long terme

Mouvements de convergence : une augmentation significative du gain a été retrouvée entre les deux premiers (0.68 ± 0.20 contre 0.92 ± 0.20 , $Z=2.31$, $p = 0.021$) et les deux deuxièmes (0.66 ± 0.20 contre 0.94 ± 0.17 , $Z=2.67$, $p = 0.008$) tests de vergence réalisés pendant la première séance et pendant la cinquième séance de réhabilitation, c'est-à-dire au démarrage et à la fin du programme d'entraînement. Une variabilité significativement plus faible a été retrouvée lors du deuxième test de la cinquième séance en comparaison des résultats du deuxième test de la première séance (13 ± 6 contre 29 ± 22 , $Z=2.07$, $p = 0.038$).

Mouvements de divergence : une augmentation significative du gain a été retrouvée en comparant les deuxièmes tests réalisés lors de la première et de la cinquième séance de réhabilitation (0.69 ± 0.13 contre 0.81 ± 0.14 , $Z=2.19$, $p = 0.028$). Une variabilité de mouvement significativement moins importante a aussi été retrouvée en comparant les résultats des premiers tests réalisés lors de la première et de la cinquième séance d'entraînement (36 ± 30 contre 14 ± 7 , $Z=2.07$, $p = 0.038$) et des deuxièmes tests (17 ± 10 vs 13 ± 11 , $Z=2.31$, $p = 0.021$).

Nous avons comparé l'évolution simultanée des scores de symptomatologie (CISS) et des valeurs de gain en convergence et en divergence avant et après les cinq séances d'entraînement. La diminution du score CISS n'était pas significativement corrélée avec l'augmentation des gains en vergence ($p > 0.05$, en utilisant un test de corrélation de Spearman, voir Fig. 5)

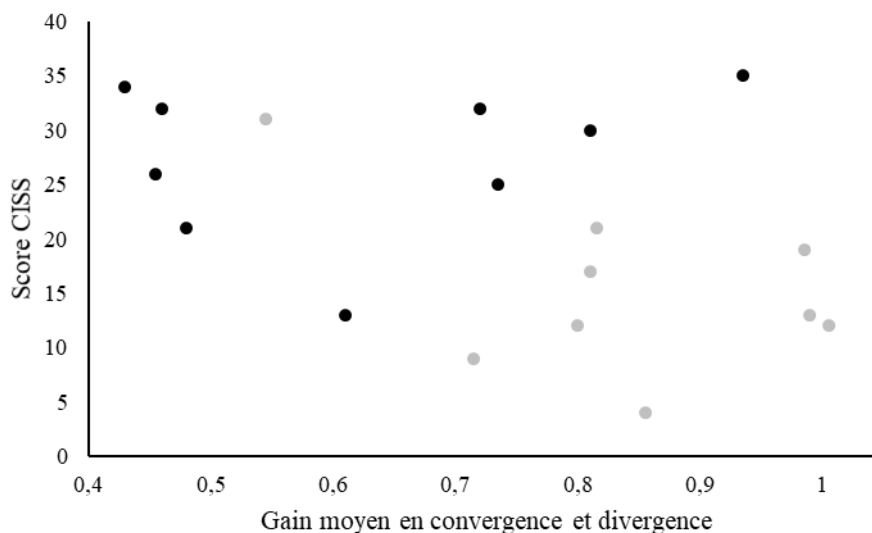


Figure 5 : Diagramme de dispersion des scores CISS lors du 1^{er} test de vergence de la première séance (points noirs, avant la réhabilitation) et lors du 1^{er} test de vergence de la cinquième séance (points gris, à la fin de la réhabilitation) en fonction des valeurs moyennes des gains en convergence et divergence ((somme des gains en convergence et divergence)/2).

Tests de lecture

Paramètres des saccades de lecture

Le nombre, l'amplitude moyenne en degré et les écart-types correspondants pour les saccades progressives et régressives sont résumés sur la Figure 6. L'analyse a montré un nombre plus fréquent de saccades progressives que de saccades de régression, qui représentaient 16.11% du total des saccades accomplies par l'ensemble des sujets (Fig. 3-B). Les saccades progressives étaient d'une amplitude plus importante que les saccades de régression ($2.77 \pm 0.05^\circ$ contre $1.85 \pm 0.11^\circ$).

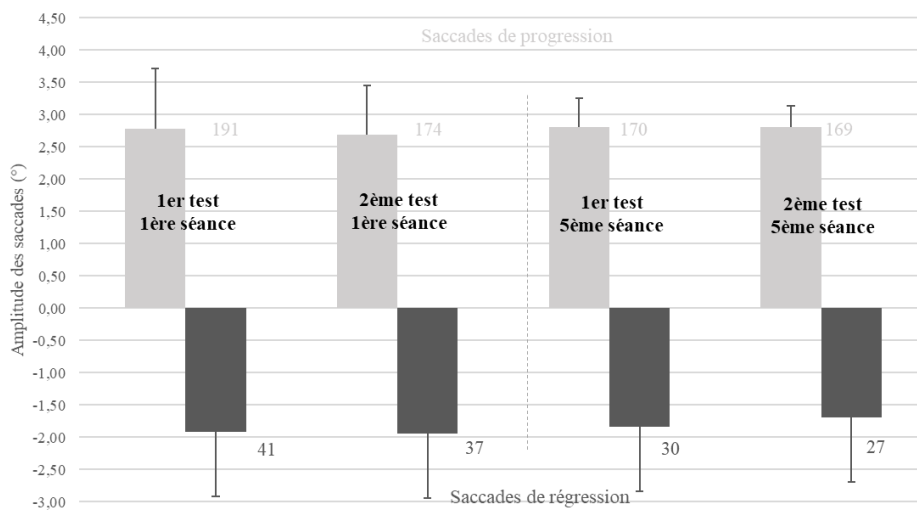


Figure 6 : Amplitude moyenne et ET des saccades de progression (gris clair) et de régression (gris foncé) effectuées dans les 1er et 2ème tests de lecture des 1ères et des 5èmes séances de réhabilitation. Les nombres à côté des colonnes correspondent au nombre de saccades effectuées.

Nous avons rassemblé les résultats relatifs à chaque test de lecture réalisé pour les neuf sujets de l'étude : les valeurs moyennes de l'amplitude des saccades, des durées de fixation, de l'amplitude de la disconjugaison pendant la saccades et des glissades conjuguées et disconjuguées sont reportées en Table 3A pour les saccades progressives et en Table 3B pour les saccades de régression. Les détails concernant les résultats de la disconjugaison sont présentés en Figure 7 pour les deux types de saccades.

	Premier test 1 ^{ère} séance	Dernier test 1 ^{ère} séance	Premier test 5 ^{ème} séance	Dernier test 5 ^{ème} séance
--	---	---	---	---

3A – Saccades progressives

Amplitude des saccades (°)	2.78 (± 0.93)	2.69 (± 0.75)	2.81 (± 0.45)	2.80 (± 0.33)
Durée de fixation (ms)	286.46* (± 59.97)	269.92* (± 51.08)	266.79* (± 56.70)	258.33* (± 55.38)
Amplitude de disconjugaison (°)	0.05 (± 0.17)	0.01 (± 0.15)	0.03 (± 0.13)	0.03 (± 0.13)
Amplitude de disconjugaison (°) Valeur absolue	0.21* (± 0.10)	0.19 (± 0.09)	0.15* (± 0.08)	0.16 (± 0.07)
Amplitude de la glissade disconjuguée Après 80 ms (°)	-0.02 (± 0.09)	-0.03 (± 0.07)	-0.02 (± 0.09)	-0.01 (± 0.08)
Amplitude de la glissade disconjuguée Après 80 ms (°) Valeur absolue	0.12 (± 0.06)	0.11 (± 0.05)	0.09 (± 0.04)	0.10 (± 0.04)
Amplitude de la glissade disconjuguée Après 160 ms (°)	-0.03 (± 0.13)	-0.05 (± 0.10)	-0.05 (± 0.13)	-0.03 (± 0.13)
Amplitude de la glissade disconjuguée Après 160 ms (°) Valeur absolue	0.15 (± 0.08)	0.13 (± 0.05)	0.14 (± 0.07)	0.14 (± 0.06)
Amplitude de la glissade conjuguée 80ms (°)	-0.09 (±0.05)	-0.09 (±0.07)	-0.10 (±0.06)	-0.11 (±0.07)
Amplitude de la glissade conjuguée 80ms (°) Valeur absolue	0.14 (± 0.05)	0.13 (± 0.06)	0.14 (± 0.05)	0.14 (± 0.06)
Amplitude de la glissade conjuguée 160ms (°)	-0.13 (±0.06)	-0.11 (±0.08)	-0.13 (±0.08)	-0.14 (±0.08)
Amplitude de la glissade conjuguée 160ms (°) Valeur absolue	0.20 (± 0.07)	0.18 (± 0.07)	0.19 (± 0.07)	0.19 (± 0.07)

3B – Saccades de régression

Amplitude des saccades (°)	-1.92 (± 0.45)	-1.94 (± 0.55)	-1.84 (± 0.38)	-1.69 (± 0.18)
Durée de fixation (ms)	243.09 (± 53.31)	231.26 (± 57.03)	234.33 (± 65.51)	241.61 (± 62.93)
Amplitude de disconjugaison (°)	0.07 (± 0.10)	0.11 (± 0.12)	0.08 (± 0.07)	0.10 (± 0.09)
Amplitude de disconjugaison (°)	0.16 (± 0.09)	0.17 (± 0.10)	0.13 (± 0.06)	0.14 (± 0.07)
Valeur absolue				
Amplitude de la glissade disconjuguée Après 80 ms (°)	-0.06 (± 0.08)	-0.03 (± 0.07)	-0.07 (± 0.04)	-0.07 (± 0.09)
Amplitude de la glissade disconjuguée Après 80 ms (°)	0.12 (± 0.05)	0.11 (± 0.03)	0.09 (± 0.02)	0.12 (± 0.07)
Valeur absolue				
Amplitude de la glissade disconjuguée Après 160 ms (°)	-0.09 (± 0.10)	-0.03 (± 0.13)	-0.08 (± 0.06)	-0.07 (± 0.07)
Amplitude de la glissade disconjuguée Après 160 ms (°)	0.16 (± 0.07)	0.14 (± 0.06)	0.12 (± 0.04)	0.13 (± 0.08)
Valeur absolue				
Amplitude de la glissade conjuguée 80ms (°)	0.14 (±0.18)	0.06 (±0.31)	0.10 (±0.08)	0.11 (±0.11)
Amplitude de la glissade conjuguée 80ms (°)	0.17 (± 0.18)	0.23 (± 0.23)	0.13 (± 0.08)	0.15 (± 0.09)
Valeur absolue				
Amplitude de la glissade conjuguée 160ms (°)	0.17 (±0.17)	0.02 (±0.63)	0.10 (±0.10)	0.13 (±0.13)
Amplitude de la glissade conjuguée 160ms (°)	0.22 (± 0.16)	0.37 (± 0.51)	0.18 (± 0.09)	0.18 (± 0.13)
Valeur absolue				

	3C – Temps total de passation			
Temps total de lecture (s)	83.11*+ (±20.19)	73.44+ (±18.66)	72.00* (±19.97)	67.00 (±17.46)

* Effet à long terme significatif (comparaison entre les premiers ou les derniers tests de chaque séance)

+ Effet à court terme significatif (comparaison entre premier et dernier test de la même séance)

Table 3 : Valeurs moyennes et écart-types des paramètres des saccades progressives (A, p300) et de régression (B, p301), ainsi que du temps total d'accomplissement pendant les tests de lecture (C, p302). Les différences significatives sont indiquées en gras ($p < 0.05$).

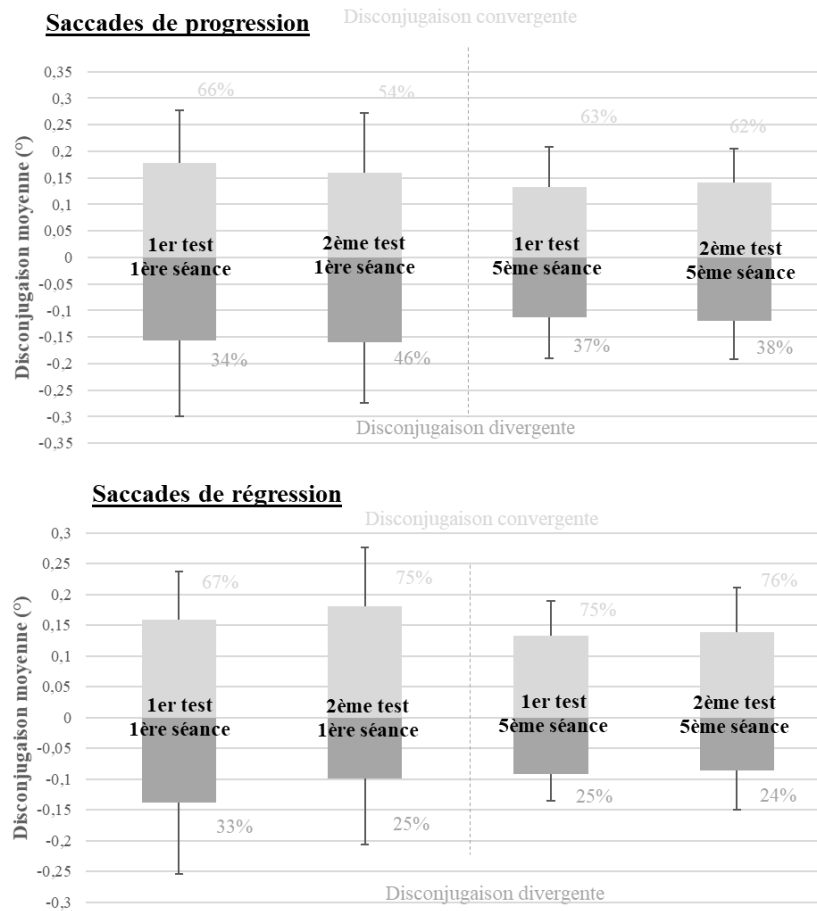


Figure 7 : Disconjugaison des saccades de progression et de régression : valeurs moyennes et ET de la disconjugaison des saccades de signe positif (gris clair) et de signe négatif (gris foncé). La proportion des saccades réalisées avec une disconjugaison positive et négative est indiquée en pourcentage à côté de chacune des barres et pour chaque test de lecture effectué.

Chez la majorité des sujets (entre 67% et 89%, dépendant du test de lecture étudié), l'amplitude de la disconjugaison intra-saccadique était négativement et significativement corrélée ($p < 0.05$) avec l'amplitude de la glissade post-saccadique suivante, qu'elle soit mesurée 80ms ou 160 ms après la fin de la saccade. Ce résultat est similaire à celui de Vernet et al (2009), et suggère que la glissade post-saccadique agit majoritairement, pendant le début de la fixation, à réduire la disconjugaison apparue pendant la saccade. Les valeurs des coefficients de corrélation r_s de Spearman sont présentées en Table 4 pour chaque sujet et chaque test de lecture réalisé. Les résultats significatifs ($p < 0.05$) sont indiqués en caractère gras. En regroupant les données de chacune des saccades de chaque sujet et en étudiant la même relation entre amplitude de la disconjugaison et amplitude de la glissade post-saccadique, nous observons de façon similaire une corrélation significative pour chacun des tests de lecture réalisé ($p < 0.001$, voir la Figure 8), ce qui confirme les résultats des données individuelles.

Valeur des coefficients de corrélation R_s de Spearman (80ms)				
Sujet	1er test, 1ère séance	2ème test, 1ère séance	1er test, 5ème séance	2ème test, 5ème séance
s1	-0.69	-0.57	-0.59	-0.75
s2	-0.49	-0.57	-0.24	-0.59
s3	-0.79	-0.61	-0.44	-0.42
s4	0.1	-0.14	-0.28	-0.17
s5	-0.33	0.02	-0.22	-0.09
s6	-0.23	-0.44	-0.37	-0.24
s7	-0.34	-0.4	-0.38	-0.55
s8	-0.52	-0.32	-0.62	-0.39
s9	-0.44	-0.56	-0.63	-0.68
Valeur des coefficients de corrélation R_s de Spearman (160ms)				
Sujet	1er test, 1ère séance	2ème test, 1ère séance	1er test, 5ème séance	2ème test, 5ème séance
s1	-0.62	-0.57	-0.64	-0.72
s2	-0.28	-0.37	-0.11	-0.53
s3	-0.77	-0.61	-0.34	-0.37
s4	0.07	-0.15	-0.27	-0.16
s5	-0.29	0.07	-0.17	-0.09
s6	-0.25	-0.26	-0.33	-0.22
s7	-0.36	-0.39	-0.28	-0.56
s8	-0.39	-0.17	-0.47	-0.28
s9	-0.28	-0.55	-0.49	-0.64

Table 4 : Coefficients de corrélation de Spearman (r_s) entre l'amplitude de disconjugaison des saccades et l'amplitude de la glissade post-saccadique calculée 80ms

et 160 ms après la fin des saccades. Les corrélations significatives ($p < 0.05$) ont été indiquées en caractère gras.

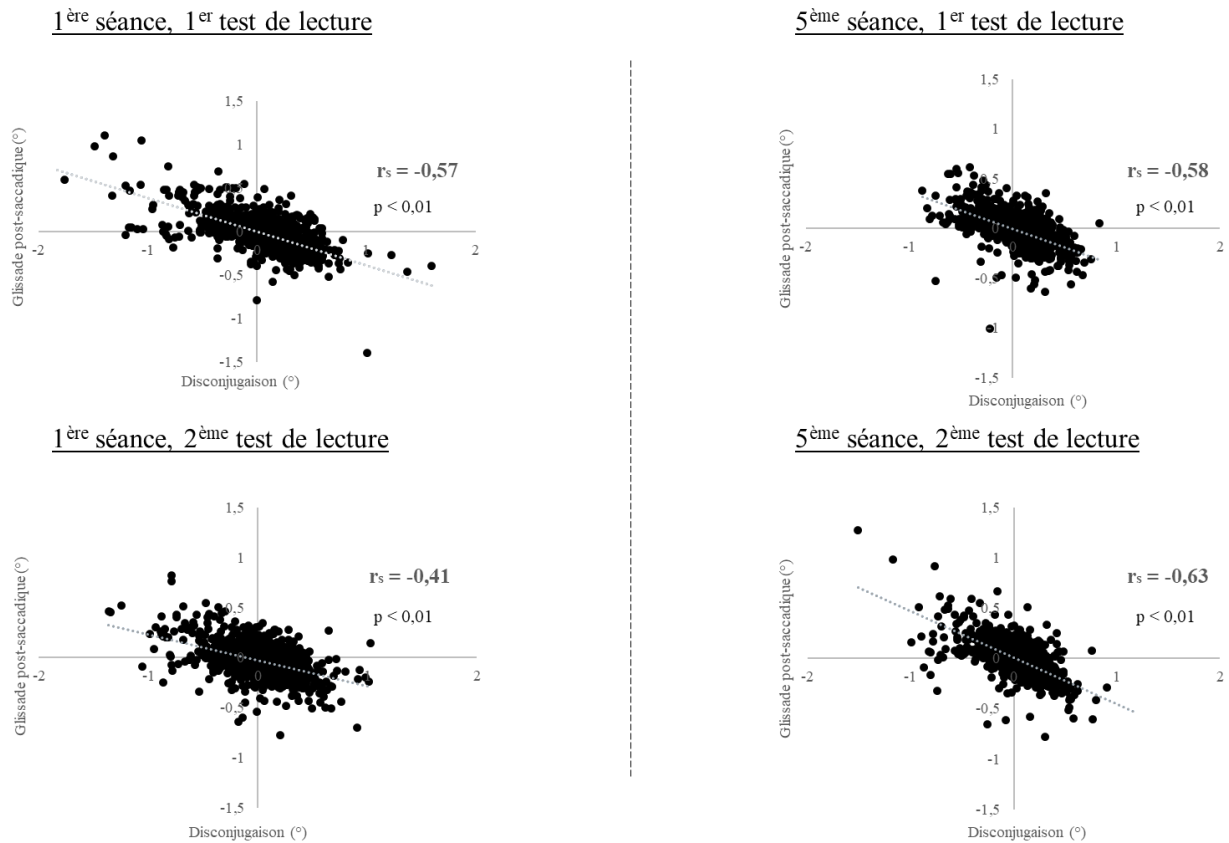


Figure 8 : Diagramme de dispersion de l'amplitude des glissades post-saccadiques mesurée 80ms après la fin de la saccade en degrés (°) en fonction de l'amplitude de la disconjugaison pendant la saccade de lecture précédente (°). L'entièreté des données a été utilisée pour chacun des tests de lecture de chaque séance. Les coefficients de corrélation de Spearman (r_s) sont indiqués pour chacun des tests réalisés.

Effets à court terme

Saccades progressives et fixations : aucun changement significatif n'a été retrouvé en terme d'amplitude des saccades, de durée de fixation ou glissade post-saccadique conjuguée ou disconjuguée concernant les saccades progressives ($p > 0.05$).

Saccades de régression et fixations : une différence a été retrouvée concernant le nombre de saccades de régression entre le premier et le deuxième test de chacune des séances (41 ± 18 contre 37 ± 14 pour la première séance, 30 ± 14 contre 27 ± 15 pour la cinquième séance). Cependant, cette différence ne s'est pas révélée significative (respectivement $Z = 0.89$, $p = 0.37$ et $Z = 1.12$, $p = 0.26$). Aucun changement significatif n'a été retrouvé en terme d'amplitude des saccades, de durée de fixation ou glissade post-saccadique conjuguée ou disconjuguée concernant les saccades progressives ($p > 0.05$).

Effets à long terme

Saccades progressives : le test de l'ANOVA non-paramétrique de Friedman a révélé un effet significatif de la réhabilitation de la vergence sur la valeur absolue de l'amplitude de la disconjugaison intra-saccadique pendant les saccades progressives ($X^2(9,3) = 10.47$, $p = 0.015$). Additionnellement, après avoir classé les données, un test d'ANOVA à deux facteurs est venu confirmer la validité du premier résultat ($F(1,8) = 14.23$, $p = 0.0054$). Le test non-paramétrique de Wilcoxon a montré une diminution significative de la disconjugaison pendant la saccade après l'accomplissement du protocole de réhabilitation de la vergence, particulièrement entre les premiers tests de lecture de la première et de la cinquième séance ($0.21 \pm 0.10^\circ$ vs $0.15 \pm 0.08^\circ$, $Z = 2.67$, $p = 0.008$).

Le test de l'ANOVA non-paramétrique de Friedman a révélé un effet significatif de la réhabilitation de la vergence sur les durées de fixation pendant les saccades progressives ($X^2(9,3) = 10.20$, $p = 0.017$). Additionnellement, après avoir classé les données, un test d'ANOVA à deux facteurs est venu confirmer la validité du premier résultat ($F(1,8) = 30.76$, $p = 0.00054$). Le test non-paramétrique de Wilcoxon a montré une diminution significative des durées de fixation pendant la lecture après l'accomplissement du protocole de réhabilitation de la vergence, entre les premiers tests de lecture de la première et de la cinquième séance (286.46 ± 59.97 ms contre 266.79 ± 56.70 ms, $Z = 2.67$, $p = 0.008$) et entre les deuxièmes tests de lecture de la première et de la cinquième séance (269.92 ± 51.08 ms contre 258.33 ± 55.38 ms, $Z = 2.31$, $p = 0.021$).

Saccades de régression : en comparant la première et la cinquième séance de rééducation, nous avons observé une diminution du nombre de saccades de régression pour les premiers tests de lecture (41.11 ± 18.29 contre 30.22 ± 14.18) ainsi que pour les deuxièmes tests de lecture réalisés (37 ± 14.74 contre 27.11 ± 15.49). Une différence significative a été retrouvée concernant la comparaison des premiers tests de lecture ($Z = 2.25$, $p = 0.024$). Additionnellement, après avoir classé les données, un test d'ANOVA à deux facteurs est venu confirmer la validité du premier résultat ($F(1,8) = 12.903$, $p = 0.0071$). Cependant, la différence retrouvée entre les deux deuxièmes tests de chaque séance ne s'est pas révélée significative ($Z = 1.95$, $p = 0.05$).

Aucun changement significatif n'a été retrouvé en termes d'amplitude des saccades, de durée de fixation ou glissade post-saccadique conjuguée ou disconjuguée concernant les saccades progressives ($p > 0.05$).

Temps total de lecture

Les moyennes relatives au temps total de lecture sont présentées sur la Table 3C. Le test de l'ANOVA non-paramétrique de Friedman a révélé un effet significatif de la réhabilitation de la vergence sur le temps total d'accomplissement du texte l'*Alouette* ($X^2(9, 3) = 14.97$, $p = 0.0019$).

Effets à court terme

En comparant les résultats du premier et du deuxième test de lecture de la première séance, le test non-paramétrique de Wilcoxon a montré une diminution significative du temps total de lecture après une session d'entraînement ($83.11 \pm 20.19s$ contre $73.44 \pm 18.66s$; $Z=2.25$, $p = 0.024$). Additionnellement, après avoir classé les données, un test d'ANOVA à deux facteurs est venu confirmer la validité du premier résultat ($F(1,8) = 12$, $p = 0.0085$). Cependant, la diminution ne s'est pas avérée significative pendant la cinquième séance d'entraînement ($72.0s \pm 19.97$ vs $67.0s \pm 17.46$; $Z=1.54$, $p = 0.12$), à la fin du protocole de réhabilitation.

Effets à long terme

La comparaison réalisée avec le test non-paramétrique de Wilcoxon entre les premiers tests de lecture réalisés lors de la première séance et de la cinquième séance de réhabilitation a montré une réduction significative du temps d'accomplissement en lecture ($83.11 \pm 20.19s$ contre $72 \pm 19.97s$; $Z=2.67$, $p = 0.0076$). Additionnellement, après avoir classé les données, un test

d'ANOVA à deux facteurs est venu confirmer la validité du premier résultat ($F(1,8) = 21.33$, $p = 0.0017$). Une diminution du temps total de lecture a aussi été retrouvée en comparant les deuxièmes tests réalisés lors de la première et de la cinquième séance de réhabilitation, mais cette différence ne s'est pas révélée significative ($73.44 \pm 18.66s$ contre $67.0 \pm 17.46s$; $Z=1.54$, $p = 0.12$).

Les deux paramètres ayant significativement évolué après la fin du protocole de réhabilitation étant l'amplitude de la disconjugaison pendant la saccade et la durée de fixation, une analyse de régression multiple a été appliquée afin d'isoler le paramètre le plus à même de prédire la diminution du temps total de lecture. Les résultats de cette analyse sont présentés en Table 5. Comme prévu au regard des caractéristiques motrices de la lecture, la durée de fixation s'est révélée être le meilleur paramètre pour prédire l'évolution du temps total de lecture, étant donné qu'ils restent significativement et positivement corrélés pour le premier test de la première séance et pour les deux tests de la cinquième séance ($p < 0.02$) : plus les durées de fixation étaient courtes en moyenne, plus le temps total de lecture était court lui aussi. Cette significativité n'était pas retrouvée concernant la disconjugaison intra-saccadique ($p > 0.05$).

Chronologie	Variables	B	SE B	β	SE β	p
1^{er} test, 1^{ère} séance	ALRM	$R^2 = 0.679$, $F(2,6) = 6.373$, $p = 0.033^*$				
	Durée de fix.	0.28	0.08	0.83	0.24	0.0129*
	Disconjugaison	3.81	47.12	0.02	0.24	0.94
2^{ème} test, 1^{ère} séance	ALRM	$R^2 = 0.457$, $F(2,6) = 2.530$, $p = 0.159$				
	Durée de fix.	0.25	0.11	0.69	0.31	0.0705
	Disconjugaison	7.41	58.92	0.04	0.31	0.90
<hr/>						
1^{er} test, 5^{ème} séance	ALRM	$R^2 = 0.731$, $F(2,6) = 8.147$, $p = 0.019^*$				
	Durée de fix.	0.25	0.07	0.85	0.22	0.0081**
	Disconjugaison	8.00	48.30	0.04	0.22	0.87
2^{ème} test, 5^{ème} séance	ALRM	$R^2 = 0.692$, $F(2,6) = 6.742$, $p = 0.029^*$				
	Durée de fix.	0.27	0.07	0.85	0.23	0.0107*
	Disconjugaison	-30.12	61.38	-0.11	0.23	0.64

Table 5 : Résultats de l'analyse linéaire de régression multiple (ARM), comme modèle pour prédire le temps total de lecture depuis les valeurs moyennes des durées de fixation et les valeurs absolues moyennes de la disconjugaison des saccades.

Pour résumer, les principaux résultats relatifs aux effets significatifs à courts et longs termes de la réhabilitation de la vergence sur les différents paramètres de la lecture sont présentés en Table 6.

		Effets à court terme (1 ^{ère} séance)	Effets à court terme (5 ^{ème} séance)	Effets à long terme (1 ^{ers} tests)	Effets à long terme (2 ^{èmes} tests)
Temps total de lecture (s)	Moy.	-9.67	-5.00	-11.11	-6.44
	ET	(±9.54)	(±7.55)	(±9.94)	(±11.23)
Durée de fixation (ms)	Moy.	-16.54	-8.46	-19.67	-11.60
	ET	(±31.98)	(±21.38)	(±17.59)	(±11.01)
Disconjugaison (°, valeur absolue)	Moy.	-0.02	0.01	-0.06	-0.03
	ET	(±0.06)	(±0.03)	(±0.06)	(±0.07)
Nombre de saccades de régression	Moy.	-4.11	-3.11	-10.89	-9.89
	ET	(±13.21)	(±11.58)	(±11.68)	(±12.94)

Table 6 : Valeurs moyennes et écarts-types (ET) des différences entre les conditions concernant les effets à court terme et à long terme.

Groupe contrôle

La lecture du test de l'Alouette a aussi été réalisée deux fois d'affilée sur trois étudiants ne présentant pas de désordre de la vergence. Les résultats ont montré qu'à 35 minutes d'intervalle, le temps total de lecture a diminué pendant le deuxième test ($77 \pm 5s$ contre $75 \pm 8s$). Cette différence ne s'est cependant pas révélée significative ($p > 0.05$).

Discussion

Résumé des résultats

Les résultats des analyses ont montré une incidence beaucoup plus importante de la réhabilitation de la vergence avec REMOBI sur le long terme que sur le court terme. La réalisation entière du protocole « *vergence double step* » a permis d'augmenter la précision et l'amplitude des mouvements de vergence, tout en réduisant leur variabilité. Ce comportement indique l'existence d'une neuroplasticité oculomotrice centrale, similaire à celle décrite dans de nombreuses études concernant les mouvements de saccade (Alahyane et al., 2005 ; Miller et al., 1981). Le protocole ainsi suivi a entraîné une amélioration globale du contrôle des mouvements de vergence. Plus encore, les valeurs de gain en vergence mesurées en fin de protocole sont similaires voire meilleures en comparaison de celles retrouvées chez les sujets contrôle (Kapoula et al., 2016), attestant de l'efficacité de cette méthode de réhabilitation.

Seuls deux paramètres ont montré une évolution après une unique séance de réhabilitation de la vergence : (1) le temps total de lecture, avec une diminution significative retrouvée après la première séance de rééducation ; (2) le gain en divergence, qui a augmenté entre les deux tests de la dernière séance de rééducation.

Sur un plus long terme, le protocole de réhabilitation de la vergence ainsi testé a montré des évolutions positives sur plusieurs paramètres : (1) la symptomatologie a significativement diminué ; (2) les réserves fusionnelles en convergence en distance lointaine et mesurées à l'aide d'une évaluation orthoptique ont augmenté ; (3) les gains des mouvements de convergence et de divergence mesurés objectivement par vidéo-oculographie ont augmenté et la variabilité dans l'amplitude de ces mouvements a diminué ; (4) le temps total de lecture pour le même texte a diminué entre la première et la dernière séance de réhabilitation ; (5) la durée des fixations pendant la lecture a diminué ; (6) la valeur absolue de l'amplitude de la disconjugaison intra-saccadique pendant les saccades de lecture a diminué ; (7) le nombre de saccades de régression pendant la lecture a diminué.

Effets à court terme : augmentation de la vitesse de lecture

Les effets d'une séance de réhabilitation sur les mouvements de vergence ont été plutôt faibles : 35 minutes d'entraînement ont seulement entraîné une augmentation significative du gain en divergence (0.06 ± 0.06), et ce uniquement lors de la dernière séance. Malgré tout, nous avons constaté une tendance à la réduction de la variabilité du mouvement en

convergence et en divergence, particulièrement pendant la première séance (respectivement réduite de $8 \pm 26\%$ et $19 \pm 32\%$), ce qui témoignerait d'un meilleur contrôle global de la vergence. Associé à cela, nous avons constaté une diminution significative de 10s du temps total de lecture pour lire le texte, ce qui n'était le cas que pendant la première séance. Une diminution similaire a aussi été constatée pendant la dernière séance, d'une valeur cependant moins importante (5s) et non significative. Il est de ce fait intéressant de se focaliser sur cette diminution du temps total de lecture, qui pourrait être logiquement attribuée à un simple effet de répétition du même test après seulement 35 minutes. Cependant, l'étude des étudiants contrôle nous a montré une diminution de seulement deux secondes en moyenne après le même intervalle de temps ($77 \pm 5s$ pour le premier essai contre $75 \pm 8s$ pour la répétition), témoignant d'un effet limité de la répétition. En parallèle, les paramètres des saccades de progression et des saccades de régression ainsi que les durées de fixation n'ont pas montré de variation significative après une seule séance de réhabilitation. Malgré ceci, il est important de noter que les valeurs des durées de fixation et de l'amplitude de disconjugaison intra-saccadique ont montré une modulation plus importante après la première séance qu'après la dernière séance, c'est-à-dire à la fin du protocole de réhabilitation. Il est donc possible de résumer de façon globale ces différents résultats par le fait que les faibles variations constatées au niveau des mouvements de vergence correspondent à de faibles variations relevées pendant la lecture au niveau des propriétés des saccades et des fixations. La diminution significative du temps total de lecture, qui reste le seul bénéfice immédiat, est potentiellement la résultante de ces effets, si faibles qu'ils soient, après la première séance. En conséquence, nous soutenons qu'en parallèle d'un effet de répétition, une partie de la diminution du temps total de lecture provient de l'amélioration de la coordination binoculaire pendant la saccade, entraînant de ce fait une réduction des durées de fixation : la vitesse de lecture a augmenté, possiblement à cause de la diminution de la disconjugaison des saccades et des durées de fixation (voir effet à long terme pour plus de précision).

La présence de modulations plus fortes seulement après la première séance de réhabilitation et pas après la dernière nous montre la nature des désordres de la vergence. En d'autres termes, les effets à court terme ne sont visibles seulement lorsque le système de vergence n'est pas encore complètement réhabilité. Après 4 séances d'entraînement, ce même système s'était stabilisé, en témoigne l'absence de changement pendant la cinquième et dernière séance. Des modulations plus importantes concernant la vergence ont été constatées en comparant les

résultats de la première et de la dernière séance, c'est-à-dire sur un plus long terme, une fois le protocole entier de réhabilitation terminé, ce que nous présenterons par la suite.

Effets à long terme : diminution de la disconjugaison pendant les saccades

Après 5 séances de réhabilitation de la vergence basées sur une méthode issue de la recherche, un nombre plus important d'évolutions positives a été observé : subjectivement, la symptomatologie a diminué, en association avec l'augmentation du gain dans les mouvements de convergence et de divergence (respectivement augmenté de 0.24 ± 0.25 et 0.18 ± 0.24 en comparant la première et la dernière séance) et de la régularité (diminution de la variabilité de respectivement $23 \pm 25\%$ et $22 \pm 30\%$), ainsi que l'augmentation des réserves fusionnelles évaluées avec une barre à prismes. La diminution significative de la symptomatologie (score CISS) n'est cependant pas significativement corrélée à l'augmentation du gain en vergence. Cependant, le nombre limité de participants appelle à de plus profondes recherches sur un échantillon plus large.

Cette étude démontre la validité clinique de l'appareil REMOBI et l'efficacité du protocole de réhabilitation de la vergence en seulement 5 séances de 35 minutes chacune, représentant un total de 2200 mouvements de vergence. Ces résultats ont été présentés et discutés de façon plus approfondie dans une autre étude (Kapoula et al., 2016). Ici, nous nous focalisons sur les effets de la réhabilitation de la vergence sur la disconjugaison pendant les saccades, paramètre qui reste l'indicateur principal de la qualité de la coordination des deux yeux pendant ces mouvements. Une coordination optimale implique que les axes visuels des deux yeux se croisent sur la même lettre pendant la lecture, permettant ainsi la perception unique du mot et facilitant ainsi le processus de lecture. Il a été proposé qu'une coordination binoculaire parfaite pendant les saccades en lecture était à la fois dépendante de l'expérience et de la neuroplasticité (Bucci et al., 2008 ; Vernet et al., 2008). En particulier, la neuroplasticité impliquerait une capacité à programmer une petite et rapide commande de vergence appropriée agissant promptement pendant la saccade. Cette commande de vergence va aider à réduire la disconjugaison qui résulterait de l'asymétrie des circuits d'innervation et des muscles adducteurs et abducteurs (Bucci et Kapoula, 2006). Aussi, comme le gain en vergence dans un plan médian a augmenté et que la disconjugaison pendant la saccade a été diminuée suite à la réhabilitation de la vergence, nous pouvons en déduire que la vergence intra-saccadique nécessaire à une meilleure coordination binoculaire de la saccade a aussi montré des signes d'amélioration. Ces résultats apportent donc des preuves plus

convaincantes pour l'existence d'un tel mécanisme hypothétique, et confirment la présence de cette plasticité neuronale chez le jeune adulte, avec seulement cinq séances hebdomadaires de réhabilitation. Cependant, l'échantillon limité de sujets et la variabilité retrouvée concernant le signe de la disconjugaison pendant leurs saccades en lecture appelle à des recherches plus approfondies avec un échantillon d'individus présentant des désordres de la vergence plus importants.

Réduction des durées de fixation

Le résultat majeur de notre étude concerne la réduction des durées de fixation pendant la lecture. Cette augmentation de la vitesse de la lecture est la résultante hypothétique de plusieurs processus, améliorés après la réhabilitation de la vergence et agissant en parallèle. De nombreuses études ont montré que la durée de fixation en lecture était influencée par des facteurs linguistiques comme la fréquence d'utilisation d'un mot, sa prédictibilité ou encore ses liens sémantiques avec les mots qui le précèdent (Rayner, 1998 ; Rayner et al., 2006 ; Clifton et al., 2016). Cependant, le test de l'*Alouette* a été d'abord conçu pour dépister les problèmes de lecture comme la dyslexie chez les enfants, et est composé de nombreux mots non communs, dans des phrases dépourvues de sens. L'enchaînement des phrases ne permet d'ailleurs pas non plus de trouver un sens au texte. De ce fait, il n'existe pas de relation sémantique entre les mots, qui sont dès lors beaucoup moins prédictibles dans une phrase et beaucoup plus difficile à mémoriser. Ce test est un des plus fiables pour évaluer les performances de lecture et est fréquemment utilisé pour le diagnostic et le suivi des enfants dyslexiques (Valdois et al., 2003; Lobier et al., 2012). Les étudiants participants à cette étude n'étaient pas dyslexiques, et il était important pour nous d'utiliser un test permettant d'évaluer de façon fiable la performance de lecture (Sprenger-Charlotte et al., 2009). De plus, l'évaluation et le suivi du niveau de lecture entraîne irrémédiablement la répétition de ce test dans la pratique clinique, ce qui faisait aussi partie de notre protocole. A ce titre, Wilkins et al. (1996) ont montré une forte corrélation entre les durées de fixation mesurées pendant plusieurs lectures consécutives d'un même texte. Nous avançons ici retrouver des résultats similaires, à ceci près que les durées de fixation semblent avoir été légèrement modulées par la réhabilitation de la vergence. En effet, même si un effet de répétition peut apparaître après plusieurs lectures, nous soutenons que les durées de fixation plus courtes sont en partie dûes à une amélioration de la motricité, plus particulièrement de la coordination binoculaire des saccades. Après la réhabilitation de la vergence, nous pouvons voir en Figure 9 une intéressante inversion de tendance, suggérant que lorsque les valeurs moyennes des

amplitudes de disconjugaison pendant les saccades ont diminué, le temps total de lecture a diminué lui aussi, ce qui n'était pas le cas lors de la première séance de réhabilitation. Même si l'analyse de régression multiple n'a pas montré d'impact significatif, il est possible d'avancer l'hypothèse qu'une part de la réduction des durées de fixation provient d'une meilleure coordination des saccades : pour que l'information visuelle puisse être analysée correctement pendant la lecture, la fixation se doit d'être stable et les axes visuels alignés sur la même lettre. Nous n'avons pas retrouvé de différences significatives concernant la disconjugaison des saccades, et pas concernant les données post-saccadiques relatives à la fixation. Dès lors, nous en déduisons que la vision était simple et unie dès le début de la fixation, c'est-à-dire à la fin de la saccade. L'étude de Vernet et al. (2009) a montré que le traitement de l'information visuelle commençait dès le début de la fixation (les premières 48ms). Les processus de plus haut niveau cognitif de lecture pourraient donc démarrer et être accomplis eux aussi plus tôt, entraînant de ce fait des durées de fixation plus courtes. Si cette hypothèse de traitement séquentiel est plausible, il est aussi possible d'émettre une hypothèse plus globale sur un traitement en parallèle de l'aspect moteur des saccades et de l'aspect cognitif de la lecture : si l'alignement des deux yeux sur chaque mot est meilleur, grâce à une disconjugaison plus faible, l'analyse de l'information visuelle et les processus attentionnels seront aussi de meilleure qualité, facilitant les processus de lecture.

L'effet d'une réhabilitation de la vergence sur la durée des fixations pendant la lecture est rapporté pour la première fois. Ceci renforce l'hypothèse précédemment avancée selon laquelle la vergence est un vecteur de déploiement attentionnel, en lien direct avec les fonctions exécutives cognitives (voir première étude). Ce dernier résultat, associé à la réduction du nombre de saccades de régression, corrobore l'interprétation précédente : le processus de lecture est globalement facilité, d'où le nombre moins important de saccades de régression. Cette constatation apporte un argument supplémentaire pour une connection d'importance entre processus de lecture et qualité du contrôle de la vergence. De surcroît, même si l'amplitude de disconjugaison pendant les saccades était significativement et fortement corrélée à l'amplitude de la glissade post-saccadique disconjuguée pour chaque test de lecture et pendant chacune des séances de réhabilitation, la rééducation n'a pas détérioré cette relation et l'a même renforcée. En effet, les coefficients de corrélation étaient plus forts pendant les tests réalisés lors de la cinquième séance (respectivement $r_s = -0.58$ et $r_s = -0.63$, voir Fig. 8). Ces observations restent dans la lignée de ceux de Vernet et al. (2009), et

indiquent l'existence d'un mécanisme central de vergence impliqué dans la disconjugaison intra et post-saccadique.

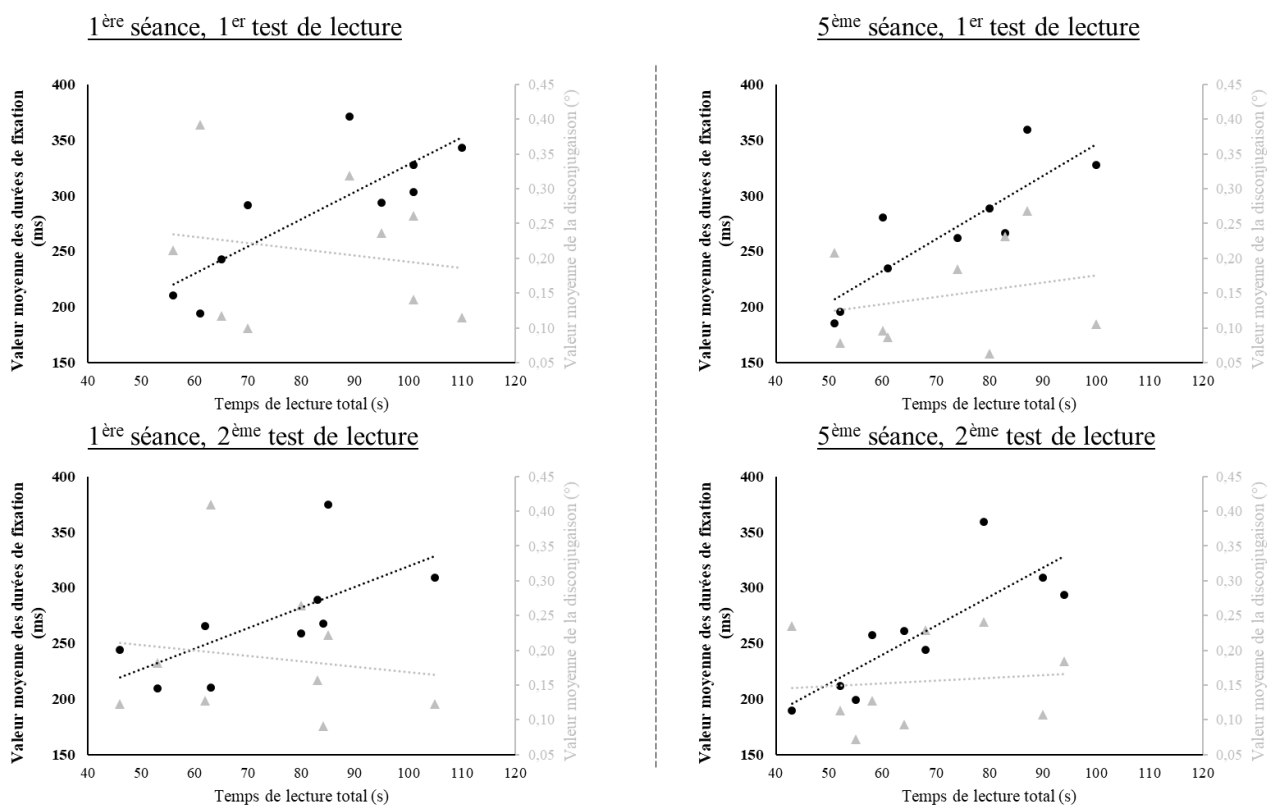


Figure 9 : Diagramme de dispersion des valeurs moyennes de l'amplitude de la disconjugaison des saccades en degrés ($^{\circ}$, gris clair) et des valeurs moyennes des durées de fixation (ms, noir) en fonction du temps total de lecture (s). Les valeurs individuelles ont été indiquées pour chaque test de lecture de chaque séance. Les droites de tendance ont été ajoutées pour chacune des variables.

Conclusion

En conclusion, la réhabilitation de la vergence à l'aide de la méthode REMOBI issue de la recherche et faisant appel à un protocole de « *double step vergence* » a non seulement permis d'améliorer la qualité de la vergence mais aussi le contrôle binoculaire des saccades et des fixations pendant la lecture. L'amélioration de la coordination binoculaire a contribué à bonifier la perception binoculaire simple des lettres et des mots lors de la lecture, entraînant une meilleure focalisation de l'attention, nécessaire elle aussi à cette même tâche.

Valorisation : Cette étude a été publiée dans le journal scientifique international *Frontiers in integrative neuroscience* en Octobre 2016. L'article original est joint ci-après.

Discussion générale

Interactions Accommodation/vergence/saccade et cognition

La première partie de notre expérimentation s'est principalement focalisée sur les interactions entre vision et cognition en utilisant le test de Stroop. La problématique réunit les 3 grands thèmes étudiés dans cette thèse : (1) les qualités des réponses de vergence et d'accommodation, essentielles en vision proche ; (2) l'exploration oculomotrice vers les différents stimuli, (3) les processus cognitifs de lecture et d'inhibition, ainsi que les processus visuels de dénomination des couleurs.

Notre première étude croisant les tests cliniques optométriques au test de Stroop apporte plusieurs résultats importants. En effet, nous retrouvons d'une part des corrélations entre le temps d'interférence au test de Stroop et les résultats de certains tests optométriques, comme celui des réserves fusionnelles et accommodatives, ainsi du punctum proximum de convergence : plus les amplitudes mesurées étaient faibles, plus le temps au test d'interférence de Stroop s'allonge pour l'échantillon entier, suggérant que plus les amplitudes de convergence et d'accommodation étaient réduites, plus la tâche d'inhibition pendant le test de Stroop était difficile à réaliser. D'un point de vue clinique, les amplitudes maximales de vergence sont très souvent mises en relation avec le confort visuel, via les critères de confort comme celui de Sheard. Pour que ce dernier soit respecté, l'amplitude de la phorie est directement mise en relation avec l'amplitude des réserves fusionnelles utiles à sa compensation, se devant d'être au moins deux fois supérieure (Sheard, 1930). L'approfondissement de l'analyse a montré sur l'échantillon que lorsque ce critère n'était pas respecté, les sujets présentaient en moyenne un effet d'interférence, ici encore, plus important. Des réserves de vergence diminuées, un contrôle de la vergence altéré, pourrait donc interférer avec le fonctionnement cognitif, en particulier concernant les facultés d'inhibition. Ce résultat vient corroborer celui des études cliniques faisant état de difficultés attentionnelles chez les personnes présentant une insuffisance de convergence. Se focalisant sur les étudiants avec ce désordre de la vergence, nous avons retrouvé chez eux un effet d'interférence plus long en comparaison des étudiants asymptotiques ne présentant pas de dysfonctionnement de l'accommodation ou de la vergence, alors que leur vitesse de lecture, elles, étaient similaires. Ce deuxième résultat montre qu'à partir de mesures cliniques optométriques, nous avons mesuré chez cette sous population une performance amoindrie au test de Stroop faisant

intervenir des fonctions exécutives d'attention, d'inhibition et impliquées dans le processus de lecture. Ces résultats apportent pour la première fois des preuves expérimentales pour l'hypothèse d'un lien entre fonctions exécutives cognitives et qualité de la synergie vergence/accommodation. L'étude fait donc la connexion entre les champs d'optométrie et d'orthoptie et la neuropsychologie cognitive.

Symptomatologie et processus cognitifs

Le rôle des symptômes dans la diminution des performances cognitives telles qu'elles sont mesurées par le test de Stroop est à discuter, car des désordres suffisamment importants pourraient provoquer des plaintes qui seraient à l'origine de difficultés dans le maintien de l'attention. La littérature nous a en effet montré qu'un dysfonctionnement est très souvent associé à une recrudescence de symptômes gênants. Ces symptômes se caractérisent par la perte du confort pendant une tâche visuelle prolongée comme la lecture (maux de tête, signes de fatigue visuelle, douleurs...) ou par la perte transitoire de la qualité de la vision (vision floue, double...). La corrélation que nous avons mise en évidence entre la symptomatologie telle qu'elle est mesurée par le questionnaire CISS et le score d'interférence du test de Stroop dans la première étude ouvre la question de la cause exacte des performances diminuées au test de Stroop. Ainsi, les symptômes visuels reportés et la perte de confort sont mis en parallèle avec les capacités d'inhibition. Il est possible d'avancer l'hypothèse que la mauvaise performance au test d'interférence est due à la symptomatologie importante, qui pourrait être présente pendant la passation de nos tests : ici, les symptômes seraient des distracteurs à l'origine de désordres dans le maintien de l'attention. Autrement dit, la symptomatologie visuelle interférerait avec les processus cognitifs comme toute autre source d'inconfort. Il y aurait donc un effet de symptomatologie non spécifique. Cependant, plusieurs études ont aussi montré l'absence de corrélation entre la sévérité des dysfonctionnements (mesurable cliniquement au nombre de mesures cliniques hors norme) et l'ampleur de la symptomatologie ressentie. Les limitations des tests cliniques, en particulier l'absence des mesures temporelles du comportement visuel et oculomoteur, ainsi que la nature subjective des symptômes ne permettent pas d'identifier un mécanisme exact.

Nous avons émis l'hypothèse d'un véritable déficit sensorimoteur, pas toujours dépisté par les tests cliniques qui concerne la qualité de la vergence, de la synergie avec l'accommodation et les saccades. En effet, si la qualité de la vision et de la motricité binoculaire (vergence et saccades) est impactée, la qualité de l'information visuelle s'en trouverait elle aussi diminuée,

ce qui, d'une part est susceptible de provoquer l'arrivée de symptômes plus fréquents, et qui d'autre part, sur un modèle séquentiel, ralentirait le traitement de cette information pendant un test à haute exigence cognitive. En effet, la performance n'étant statistiquement moins bonne que lorsque la tâche d'interférence de Stroop est prise en compte et pas lors de la lecture, il apparaît qu'un désordre de la vergence n'interfererait que pendant des tâches plus exigeantes et sollicitant beaucoup plus l'attention et l'inhibition. Ainsi, les résultats concernant l'effet d'interférence spécifique à la tâche nous renvoient à un mécanisme plus complexe d'interaction entre qualité de la vision sensorielle, de la motricité binoculaire et cognition. Rappelons que les régions corticales impliquées dans le contrôle de la vergence et de l'accommodation étant similaires à celle stimulées lors de la tâche d'interférence de Stroop, à savoir le réseau fronto-pariétal de maintien de l'attention visuelle. Cette sollicitation importante et commune du cortex visuel et des aires frontales et pariétales nous a donc amené à privilégier cette deuxième hypothèse concernant l'existence d'une interaction à plus haut niveau, cortical, entre contrôle visuomoteur binoculaire de la vergence, de l'accommodation et des saccades. Ces différents réseaux sont sollicités pendant la tâche d'interférence de Stroop, qui en parallèle nécessite l'intervention de la cognition et des processus complexes d'inhibition. Autrement dit, la spécificité de la liaison entre les troubles de la vergence mesurés cliniquement et la tâche d'interférence de Stroop témoigne elle-même d'un mécanisme d'interaction cortical spécifique.

Focalisation de l'attention et vision : une interaction sur plusieurs plans

Notre deuxième étude a été construite pour tester cette hypothèse, afin de mettre en évidence les mécanismes d'interaction entre vision, motricité binoculaire fine et cognition. Le premier résultat de cette deuxième étude a concerné l'analyse de la motricité binoculaire pendant les différentes tâches du test de Stroop. Pour la première fois en effet, nous avons pu mettre en évidence que les caractéristiques physiologiques des saccades réalisées pour parcourir le test n'étaient pas impactées par le degré cognitif des tâches de Stroop. La qualité de la coordination des saccades restait similaire, ainsi que l'amplitude de la glissade post-saccadique et de la disparité mesurée en début de fixation. Seul le nombre de très petites saccades était augmenté pendant la tâche d'interférence, contribuant à un allongement nécessaire pour cette tâche. En d'autres termes, la difficulté de la tâche cognitive n'avait pas réellement d'incidence directe sur la motricité binoculaire, mais seulement sur le type de comportement oculomoteur activé, notamment la fréquence des saccades de faible amplitude.

Le deuxième résultat important de cette étude concernait les durées de fixation, dont les valeurs étaient, elles, modulées par la nature de la tâche cognitive à accomplir : la durée de fixation moyenne était plus longue pour la tâche de dénomination que pour la tâche de lecture, et encore plus longue pour la tâche d'interférence, la plus exigeante cognitivement. Ainsi, les durées de fixation reflètent les résultats retrouvés pendant le chronométrage total du temps de chaque épreuve. La durée des fixations est en lien direct avec la charge cognitive de la tâche requise, ce qui jusqu'ici paraissait évident mais n'avait jamais été montré par l'analyse des mouvements oculaires. De ce fait, l'effet d'interférence tel que nous l'avons mesuré, par la soustraction des durées moyennes de fixation pendant les tâches de dénomination et d'interférence, refléterait le temps supplémentaire passé lors des phases de fixation à l'inhibition de la lecture. L'efficacité de la fonction d'inhibition est donc d'autant meilleure que cette différence en durée de fixation est courte, reflétant le temps requis par l'attention et l'inhibition de la lecture.

En adoptant une approche interventionniste dans cette même étude, nous avons investigué l'impact de l'induction d'un conflit A-V sur le couple oculaire, à l'aide de prismes contraignant les sujets à converger beaucoup plus que la convergence requise pour la distance de l'écran sans faire varier le plan d'accommodation, ou alors à l'aide de verres sphériques négatifs contraignant les sujets à accommoder beaucoup plus sans faire varier la demande de convergence. L'induction de ce conflit sur la synergie A-V sollicite de façon importante les réserves en accommodation et en convergence. Nous avons introduit une nouvelle façon de mesurer l'effet d'interférence via la durée des fixations, qui reste la phase concentrant le plus l'activation des processus cognitifs. Nous avons mesuré et analysé l'impact de ce conflit sur la motricité binoculaire pendant des saccades, sur la cognition via les valeurs des durées de fixation, tout ceci en fonction de la difficulté de la tâche cognitive.

Le résultat majeur de cette étude a été en effet au niveau des durées de fixation moyennes et de l'effet d'interférence calculé grâce à elles. Il apparaît qu'un conflit A-V induit, que cela soit avec des prismes ou des verres sphériques, a déstabilisé significativement les sujets en allongeant l'effet d'interférence dans les deux conditions en comparaison avec la condition contrôle (pas de prismes, pas de verres sphériques). Nous insisterons ici sur le fait que ce résultat concerne les épreuves du test de Stroop pendant lesquelles la demande cognitive est la plus importante, avec la mise en jeu du mécanisme d'inhibition, alors que la lecture simple, elle, n'est une fois encore que très peu concernée. Ces résultats corroborent l'hypothèse émise

sur une interaction entre les processus d'ajustement visuo-moteurs binoculaires et la cognition, et plus particulièrement l'inhibition telle qu'elle est stimulée par la tâche d'interférence de Stroop. Il est à noter que la condition avec prismes s'est avérée la plus déstabilisante en termes de conflit induit. Les résultats de la deuxième étude viennent donc appuyer ceux de la première étude.

En abordant la coordination binoculaire des saccades lors des tests, on constate ici encore que la condition avec prisme a eu bien plus d'impact que la condition utilisant des verres sphériques jouant uniquement sur l'accommodation. En effet, la disconjugaison était devenue significativement plus négative, indiquant une tendance plus divergente des axes visuels en fin de saccade. De plus, l'amplitude de la disconjugaison ne présentait plus une corrélation aussi forte avec la glissade post-saccadique disconjuguée, témoignant d'une disconjugaison moins bien corrigée pendant la fixation suivante, et donc d'un certain dérèglement du contrôle moteur binoculaire. De plus, la disparité mesurée en début de fixation était plus importante et plus variable, en particulier pendant la tâche d'interférence. Ces résultats concernant la déstabilisation motrice associée à la diminution de l'efficacité des processus cognitifs (effet d'interférence) pendant la condition avec prismes apportent des preuves en faveur de l'hypothèse sensorimotrice qui est au cœur de la problématique de cette thèse, faisant état d'un modèle de perturbation et d'interdépendance entre les différents processus de réglage visuomoteur binoculaire et des processus cognitifs exécutifs. Après chaque saccade réalisée vers la cible suivante pendant les différentes tâches du test, le système visuel doit traiter rapidement l'information visuelle en une image simple et nette pour en extraire les informations essentielles au niveau de son contenu et y répondre. La condition avec des prismes a perturbé la coordination binoculaire pendant les saccades ainsi que la disparité et les glissades post-saccadiques pendant la fixation. Il est plausible de penser que ce dérèglement visuomoteur binoculaire entraînerait un temps de réponse allongé et donc des durées de fixation plus longues en conséquence, ce qui est le cas pour les 3 tâches du test de Stroop en condition avec prismes, même si l'écart n'est pas toujours significatif. Cet impact, bien que subtil, expliquerait une partie des résultats. Notons que la première étude était de nature corrélative, indiquant la différence entre sujets présentant des troubles de vergence et sujets sans troubles, et prenant en compte la présence d'une symptomatologie ressentie. La deuxième étude plus interventionniste concerne des sujets sans troubles auprès desquels nous avons induit un conflit A-V temporaire réversible.

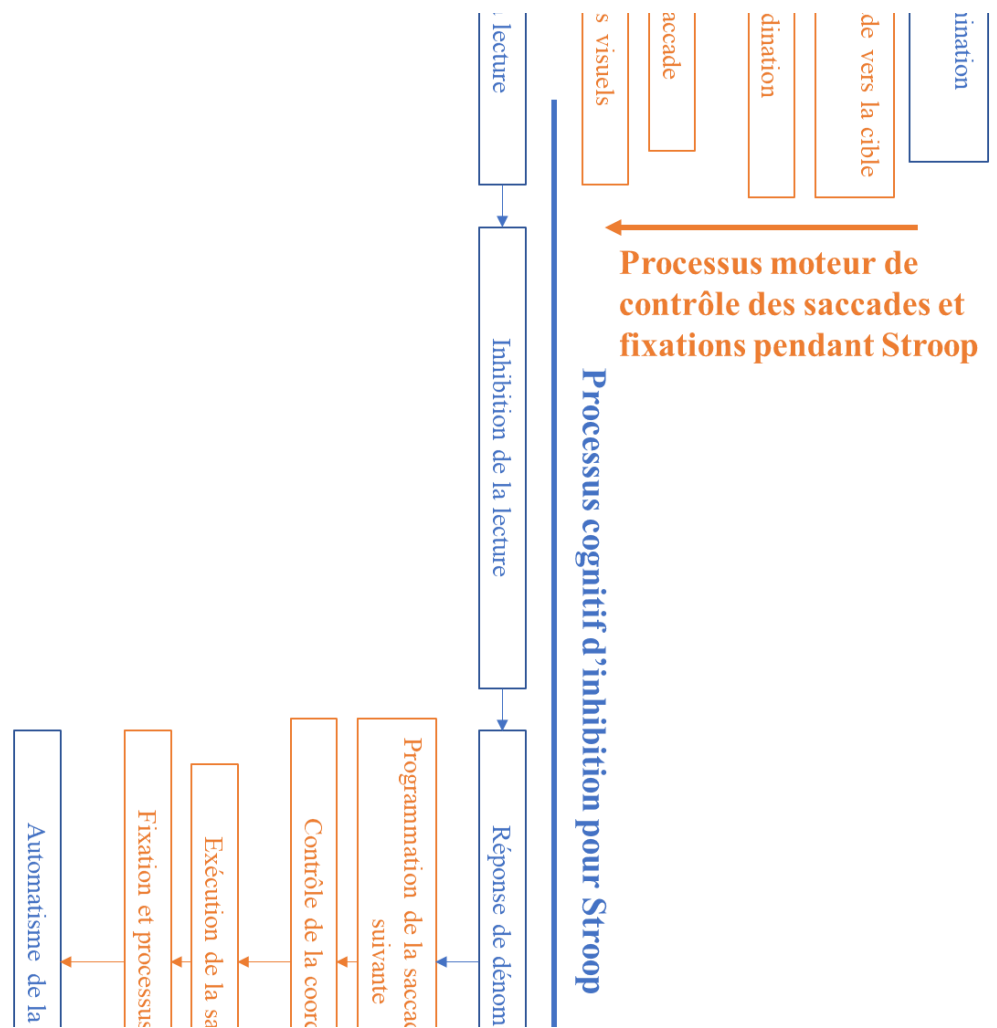


Illustration du modèle séquentiel d'interaction des processus visuo-moteur et cognitif pendant la tâche d'interférence de Stroop

Cependant, le calcul de l'interférence, réalisé en soustrayant les temps de passation, est en désaccord avec ce modèle séquentiel. L'effet d'interférence aurait été le même dans toutes les conditions, si seule l'acquisition des informations visuelles était ralentie en début de fixation, du fait de la nécessité de corriger la disconjugaison et/ou la disparité de fixation pour obtenir une image simple, nette et stable. Le conflit A-V réalisé avec des verres sphériques a eu moins d'impact que celui des prismes sur la motricité binoculaire. Toutefois, on retrouve une augmentation significative au niveau des durées de fixation, alors que la disconjugaison des saccades et la corrélation avec la glissade post-saccadique restent similaires en comparaison avec la condition contrôle. L'interaction entre processus du contrôle visuo-moteur et la cognition se ferait donc sur un modèle plus complexe et parallèle, pour lequel le mauvais

contrôle des saccades et fixations ne serait pas aussi lourdement impliqué dans la performance cognitive.

L'existence de perturbations à plus haut niveau : modèle d'interactions parallèles

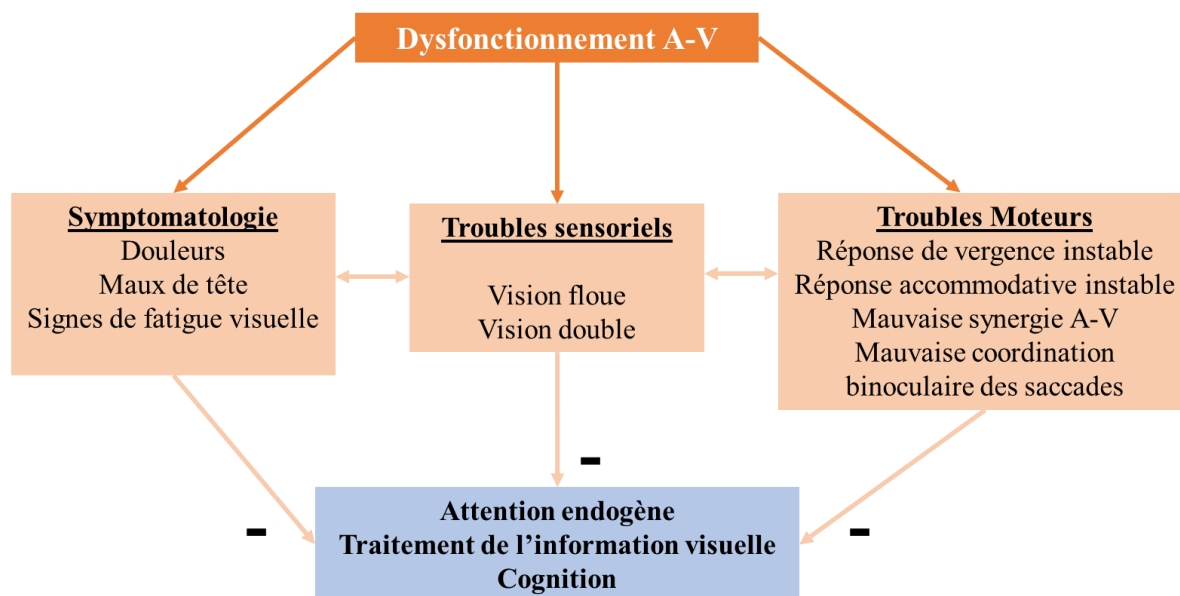
En effet, si une perturbation est retrouvée pendant la passation d'un test aussi court (la réalisation des 3 épreuves de Stroop ne prenant pas plus de 5 minutes), le coût temporel plus important relevé à chaque fixation en moyenne, dans les épreuves où les fonctions exécutives sont les plus fortement sollicitées, témoigne d'une incidence spécifique du conflit A-V induit. Un premier argument se base sur les résultats du conflit induit par des verres sphériques : l'effort accommodatif plus important dans cette condition a été effectué par la population étudiante testée, jeune (20.9 ± 1.45 ans), et présentant de très larges réserves accommodatives. L'impact premier de ce conflit, qui a d'abord stimulé le mécanisme d'accommodation réflexe, a forcément engendré une réponse en vergence accommodative, qui a dû être rééquilibrée par la réponse du système de vergence de disparité (vergence fusionnelle). Cette déstabilisation n'a été que très discrète sur le plan de la motricité pendant les saccades en comparaison des changements induits par les prismes. Elle s'est cependant retrouvée elle aussi au niveau des durées de fixation et de l'effet d'interférence, même dans une moindre mesure. De ce fait, si la déstabilisation première de la vergence avec des prismes est apparue beaucoup plus néfaste, tant sur le plan moteur (coordination des saccades, glissades disconjuguées non ou peu correctives, disparité plus importante en début de fixation) que sur le plan cognitif (effet d'interférence plus important en temps de passation comme en durée moyenne de fixation, score d'erreur plus important), le conflit induit avec les verres sphériques a lui aussi engendré un coût temporel plus important dans les tâches à haute demande cognitive, et ceci sans perturbation motrice majeure. Ce constat plaide pour une interaction à plus haut niveau que la simple hypothèse séquentielle présentée auparavant. Cette déstabilisation serait donc le fruit d'une sollicitation conjointe et plus importante des différentes aires corticales impliquées à la fois dans les réponses de vergence, d'accommodation et dans le processus d'inhibition évalué par le test de Stroop. Les conflits A-V ainsi induits ont sollicité une réorganisation de l'activité des régions impliquées dans la réponse en accommodation et convergence, donc l'intervention des processus d'adaptation rapide (vergence fusionnelle, accommodation réflexe) faisant appel à certaines structures frontales (FEF, SEF, DLPFC) et pariétales (PPC) similaires, provoquant ainsi la déstabilisation des processus cognitifs. Cette deuxième hypothèse de modèle fonctionnant en parallèle propose une incidence beaucoup plus subtile, mais significative, des processus visuels sur la cognition. Ainsi, le système présenté en page

322 pourrait être revu avec des sous processus en parallèle et partageant un circuit neuronal commun.

La qualité de la synergie A-V est donc un facteur déterminant du bon fonctionnement visuel en relation avec la cognition. Un manque d'appariement semble provoquer une diminution globale des processus cognitifs de haut niveau pendant le test de Stroop, et ce même sur un intervalle de temps très court. Il est important de noter que dans ces expérimentations, nous observons une diminution des scores liés aux processus cognitifs exécutifs, aussi bien pour des sujets présentant une symptomatologie élevée associée à un dysfonctionnement A-V (étude 1) que pour des sujets ne présentant pas à l'origine de dysfonctionnement A-V (étude 2). Cela indique que le conflit A-V peut être néfaste à la cognition même en l'absence de symptômes ressentis et cela a des implications importantes au niveau de l'éducation et de la santé publique que nous discuterons ci-après.

Si les capacités d'inhibition sont perturbées par un conflit induit A-V et sont retrouvées diminuées chez les sujets présentant une insuffisance de convergence, l'hypothèse d'une interaction en parallèle des processus visuel et cognitif est ici privilégiée. Les résultats de nos études plaident pour l'existence d'une intrication entre régions corticales impliquées à la fois dans les processus visuomoteur, attentionnel et cognitif. Les symptômes visuels en lien avec un dysfonctionnement A-V auraient une incidence secondaire, mais sont susceptibles d'accentuer le phénomène de distraction du sujet, par les douleurs et/ou la perte de qualité visuelle qu'ils entraînent. Ce constat n'est pas à négliger, car il est aussi souvent à l'origine de l'évitement des sujets pour les tâches visuelles réalisées aux distances où ces problèmes sont rencontrés. Les symptômes sont alors beaucoup moins rapportés, car moins expérimentés.

Enfin, pendant des tâches comme la lecture, où la bonne coordination des mouvements de saccades et le maintien de l'angle de vergence et du bon positionnement de l'accommodation sont importants, un désordre de la vergence et de sa synergie avec l'accommodation peut nuire au bon déploiement de l'attention et par conséquent perturber la reconnaissance ou la compréhension des mots. Qu'il soit séquentiel ou parallèle, le modèle d'interaction entre vision, motricité binoculaire, attention et cognition est une réalité qui mérite d'être davantage considérée dans le diagnostic et la prise en charge des troubles d'apprentissage. La figure ci-après résume les désordres engendrés sur différents plans par un dysfonctionnement A-V, et l'impact négatif qu'ils peuvent chacun avoir sur le déploiement attentionnel et la cognition.



Bénéfices de la réhabilitation de la vergence sur les plans visuomoteurs et cognitifs

Appuyant l'hypothèse avancée grâce à nos deux premières études concernant l'influence néfaste d'un désordre A-V sur la motricité binoculaire et sur la cognition, les résultats de notre troisième étude montrent clairement qu'une amélioration des capacités de vergence a une influence positive sur ces différents plans. La réhabilitation de la vergence réalisée à l'aide de l'appareil REMOBI chez des sujets adultes présentant un dysfonctionnement de la vergence a montré des résultats sur le plan visuomoteur d'une part : les mesures cliniques relatives à la symptomatologie ressentie (diminution du score CISS) et au bilan orthoptique (réduction du Punctum Proximum de convergence, augmentation des réserves fusionnelles en vergence) ont montré une amélioration significative de la situation, attestant de l'efficacité du traitement. De plus, les mesures objectives réalisées par vidéo-oculographie montrent à leur tour un gain augmenté en vergence, attestant d'un contrôle plus précis et plus efficient des mouvements dans la profondeur ; enfin, l'étude objective des saccades de lecture nous a permis de constater une amélioration de la coordination binoculaire avec une disconjugaison diminuée après la réhabilitation. Cette étude pionnière a tout d'abord permis de croiser de façon novatrice des résultats cliniques orthoptiques avec des résultats objectifs mesurés à l'aide de la vidéo-oculographie. Ils témoignent du rôle central de la vergence dans le contrôle oculomoteur binoculaire, en accord avec la théorie de Hering : le traitement du désordre de vergence et l'amélioration de ces capacités sont associés à un meilleur confort visuel, un meilleur contrôle des mouvements dans la profondeur et une meilleure coordination des

saccades en lecture. Il est ici plausible qu'un meilleur contrôle des mouvements de vergence ait permis une meilleure coordination des mouvements de saccades via la commande rapide de vergence intra-saccadique, comme en atteste la réduction de la disconjugaison.

Le domaine de la lecture associe capacités visuomotrices et cognitives. Ici, si les résultats de notre troisième étude montrent avant tout les bénéfices engendrés par la réhabilitation de la vergence sur le plan moteur, l'analyse de la motricité fine en lecture a aussi permis de révéler une augmentation de la vitesse de cette dernière, en lien avec une diminution des durées de fixation : la vitesse du traitement cognitif des mots pendant la lecture a donc été accélérée à la suite des séances de réhabilitation. Ces résultats, associés aux améliorations constatées sur le plan visuomoteur, nous permettent d'aborder autrement notre hypothèse concernant l'impact néfaste d'un dysfonctionnement de la vergence sur la cognition. En effet, la neuroplasticité stimulée par le programme de réhabilitation « *double-step vergence* » a aussi entraîné une facilitation des processus cognitifs de traitement de l'information visuelle pendant la lecture. Les bénéfices liés à l'amélioration des capacités de vergence se retrouvent donc jusqu'au sein de l'aspect cognitif de la lecture, nous permettant ainsi de cibler précisément la qualité du contrôle de la vergence comme élément fondamental du bon fonctionnement cognitif pendant cette tâche. Notre hypothèse première plaidait en faveur de dysfonctionnements de la vergence perturbant les processus cognitifs de haut niveau. Les résultats de notre troisième étude montrent ici que le traitement des désordres de la vergence et l'amélioration du contrôle oculomoteur entraînent réciproquement une facilitation des processus cognitifs pendant une tâche comme celle de la lecture, où vision, motricité binoculaire et cognition sont fortement sollicitées.

En lien avec la problématique de cette thèse, ces résultats indiquent avant tout la nécessité de traiter tout désordre de vergence, étant donné l'incidence bénéfique apportée par la réhabilitation, tant sur le plan de la symptomatologie, de la motricité binoculaire que sur le plan cognitif. Ils témoignent aussi de l'importante implication des qualités de vergence dans la motricité binoculaire et la cognition pendant la lecture. L'intrication des processus visuomoteurs et cognitifs présentée plus haut adopte une autre tournure, et la qualité du contrôle des mouvements de vergence apparaît comme l'élément central à privilégier, sur le plan clinique comme sur le plan théorique. En effet, la neuroplasticité de la vergence engendrée par la réhabilitation est à l'origine de l'amélioration du contrôle de la vergence, d'où découlent par la suite les bénéfices constatés dans les différents autres domaines. Le

traitement d'un dysfonctionnement A-V a aussi une incidence bénéfique sur les processus cognitifs de haut niveau, ce qui corrobore l'hypothèse du modèle d'interactions vision/motricité/cognition abordé précédemment.

Conclusion et ouverture

Cette thèse est une première et stimule l'intérêt d'ouverture indispensable dans la compréhension et la prise en charge des problèmes visuomoteurs. L'ophtalmologie, l'orthoptie et l'optométrie ne peuvent plus se limiter qu'à l'utilisation de stimuli visuels minimalistes, comme si la vision était indépendante de la cognition. Nous nous sommes attachés à étudier les interactions possibles entre les processus visuomoteur et cognitif, et notre démarche a cherché à associer la pratique clinique aux nouvelles technologies.

Dans la lumière des résultats apportés par nos études expérimentales, un premier point concernant la pratique clinique orthoptique et optométrique se doit d'être abordé. Il s'agit en particulier de la notion de positionnement accommodatif et de profondeur de champ, qui veut que l'accommodation puisse être approximativement ajustée à la profondeur physique de la cible sans pour autant nuire à la vision. D'autre part, le concept d'adaptation « lente » selon lequel l'induction par l'exercice d'une contrainte va provoquer non seulement un changement accommodatif mais aussi une modification de la réponse de vergence (rapport AC/A) ou vice-versa, une contrainte de vergence induit par un prisme va aussi modifier à la fois la réponse de vergence et la réponse accommodative selon le rapport CA/C. Notons ici que ces concepts profondément ancrés dans l'orthoptie et l'optométrie restent toutefois basés sur la pratique clinique, et que très peu d'études objectives basées sur des enregistrements par vidéo-oculographie de la vergence et de l'accommodation sont aujourd'hui venus approfondir la situation. Des études de cette nature sont entièrement à faire, et l'expérience 2 de cette thèse démontre clairement que ces mécanismes peuvent être mis en doute, ou du moins sont insuffisants ou beaucoup trop lents. En effet, ces mécanismes hypothétiques sensés compenser les conflits induits n'ont pas empêché leur influence néfaste sur les processus cognitifs exécutifs activés par le test de Stroop, de surcroît chez des sujets ne présentant pas de dysfonctionnement A-V à l'origine. Ces concepts sont remis en question pour la vision dynamique dans la vie de tous les jours où notre regard se déplace à la fois en profondeur et en direction à peu près trois fois par seconde. Les interactions entre contrôle de la vergence, de l'accommodation et contrôle des mouvements de saccade sont donc permanentes et doivent désormais faire l'objet d'analyses approfondies. Lier les sciences du mouvement, en particulier du contrôle moteur binoculaire tridimensionnel en direction et en profondeur, avec

les sciences de la vision est la seule voie d'avenir et force est de constater que ce progrès reste, de nos jours, encore lent.

Nos résultats montrent aussi les interactions retrouvées entre processus visuomoteurs et processus cognitifs. Les recherches manquent dans ce domaine d'importance, particulièrement lorsqu'on réalise l'impact qu'un dysfonctionnement peut avoir sur l'apprentissage de la lecture et par la suite, sur les performances scolaires. Nous nous sommes particulièrement attachés à étudier les interactions entre dysfonctionnements A-V et capacités d'inhibition, très liées au processus de déploiement de l'attention. Une ouverture possible serait d'approfondir ces résultats avec l'utilisation d'autres tests neuropsychologiques nécessitant eux aussi l'intervention des processus visuomoteurs, afin de constater si ces interactions sont susceptibles de se produire concernant d'autres fonctions exécutives, comme la mémoire de travail ou la flexibilité cognitive. De façon similaire, les bénéfices engendrés par la réhabilitation de la vergence ne devraient plus se limiter à l'observation des mesures cliniques orthoptiques, optométriques, ou à l'évaluation de la symptomatologie uniquement. Le contrôle de la vergence a un rôle central dans la qualité de la vision sensorielle et de la motricité binoculaire. Nos résultats montrent que son amélioration permet de fluidifier les processus cognitifs pendant la lecture. Une autre ouverture serait d'observer les bénéfices apportés par un meilleur contrôle de la vergence dans des domaines faisant plus appel à la cognition, en utilisant des tests neuropsychologiques, comme dans notre démarche avec le test de Stroop. Ainsi, il serait possible d'approfondir les résultats que nous avons présentés, en lien avec l'amélioration des processus cognitifs, et d'explorer plus en détails ces mécanismes.

Dans le cadre des problèmes de lecture et d'apprentissage, la méthodologie et les résultats apportés par nos différentes études montrent que la pratique clinique ne peut plus se limiter à une évaluation classique des dysfonctionnements A-V. La qualité des mouvements binoculaires de saccades doit aussi être évaluée de façon précise, objective et systématique, car pouvant être directement à l'origine des problèmes, en particulier dans une tâche dynamique comme la lecture. Seules des méthodes non subjectives avec mesures peuvent capter les dérèglements fins et leurs aspects temporels. La vidéo-oculographie s'avère donc être un élément désormais indispensable à l'évaluation et à la prise en charge des désordres A-V.

De même, nos résultats montrent qu'une réhabilitation de la vergence peut être entreprise avec des méthodes de « double-step vergence » inventées par Z. Kapoula (REMOBI) et

capables de restaurer la dynamique de la vergence et de l'accommodation, leur synergie et la qualité de la coordination binoculaire. Ces nouvelles méthodes, moins chronophages et plus écologiques car ne découplant pas les réponses d'accommodation et de vergence, représentent de réels avantages et de nouvelles solutions efficaces pour réduire les désordres A-V.

Bibliographie

- Abdi S, Rydberg A. (2005). Asthenopia in school children, orthoptic and ophthalmological findings and treatment. *Documenta Ophthalmologica* 111: pp 65 - 72.
- Abu Bakar NF, Ai Hong C, Pik Pin G. (2012). COVD-QOL questionnaire: An adaptation for school vision screening using Rasch analysis. *Journal of Optometry* 5(4): pp 182–187.
- Adleman NE, Menon V, Blasey CM, White CD, Warsofsky IS, Glover GH, Reiss AL. (2002). A developmental fMRI study of the Stroop color-word task. *Neuroimage* 16(1): pp 61 - 75.
- Ahnelt, P.K., Kolb, H., & Pflug, R. (1987). Identification of a subtype of cone photoreceptor, likely to be blue sensitive, in the human retina. *Journal of Comparative Neurology* 255 (1): pp 18 - 34.
- Ahola K, Vilkki J, Servo A. (1996). Frontal tests do not detect frontal infarctions after ruptured intracranial aneurysm. *Brain and Cognition* 31: pp 1 – 16.
- Aizawa H, Wurtz RH. (1998). Reversible inactivation of monkey superior colliculus. I. Curvature of saccadic trajectory. *Journal of Neurophysiology* 79(4): pp 2082 - 2096.
- Akao T, Mustari MJ, Fukushima J, Kurkin S, Fukushima K. (2005). Discharge characteristics of pursuit neurons in MST during vergence eye movements. *Journal of Neurophysiology* 93(5): pp 2415 - 2434.
- Alahyane N, Pélisson D. (2005). Long-lasting modifications of saccadic eye movements following adaptation induced in the double-step target paradigm. *Learning and Memory* 12(4): pp 433 - 443.
- Allport DA, Styles EA, Hsieh S. (1994). Shifting intention set: Exploring the dynamic control of tasks. In C. Umiltà & M. Moscovitch (Eds.), *Attention and performance XV* (pp. 421–452). Cambridge, MA: MIT Press.
- Alvarez TL, Jaswal R, Gohel S, Biswal BB. (2014). Functional activity within the frontal eye fields, posterior parietal cortex, and cerebellar vermis significantly correlates to symmetrical vergence peak velocity: an ROI-based, fMRI study of vergence training. *Frontiers in Integrative Neuroscience* pp 8 : 50.
- Alvarez TL, Kim EH. (2013). Analysis of saccades and peak velocity to symmetrical convergence stimuli: binocularly normal controls compared to convergence insufficiency patients. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 54(6): pp 4122 - 4135.
- Alvarez TL, Semmlow JL, Pedrono C. (2015). Divergence eye movements are dependent on initial stimulus position. *Vision Research* 45(14): pp 1847 - 1855.
- Alvarez TL, Semmlow JL, Yuan W, Munoz P. (1999). Dynamic details of disparity convergence eye movements. *Annals of Biomedical Engineering* 27(3): pp 380 - 390.
- Alvarez TL, Vicci VR, Alkan Y, Kim EH, Gohel S, Barrett AM, Chiaravalloti N, Biswal BB. (2010). Vision therapy in adults with convergence insufficiency: clinical and functional magnetic resonance imaging measures. *Optometry and Vision Science* 87(12): pp 985 - 1002.
- American Academy of Pediatrics Committee on Children with Disabilities, American Academy of Ophthalmology and American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus (1998) Learning disabilities, dyslexia, and vision: a subject review. *Pediatrics* 102: pp 1217 – 1219.
- American Optometric Association. (1998). Optometric Clinical Practice Guideline (CPG 18): Care of the Patient with Accommodative and Vergence Dysfunction. American Optometric Association, St Louis, MO.

- American Optometric Association. (2000). Optometric Clinical Practice Guideline (CPG 20): Care of the Patient with Learning Related Vision Problems. American Optometric Association, St Louis, MO.
- Anderson TJ, Jenkins IH, Brooks DJ, Hawken MB, Frackowiak RS, Kennard C. (1994). Cortical control of saccades and fixation in man. A PET study. *Brain* 117(5): pp 1073 - 1084.
- Andrès P, Van der Linden M. (2000). Age-related differences in supervisory attentional system functions. *The Journals of Gerontology Series B Psychological Sciences* 55: pp 373 –380.
- Aron AR. (2007). The neural basis of inhibition in cognitive control. *Neuroscientist* 13: pp 214 – 228.
- Atkinson J, Anker S, Nardini M, Braddick O, Hughes C, Rae S, Wattam-Bell J, Atkinson S. (2002). Infant vision screening predicts failures on motor and cognitive tests up to school age. *Strabismus* 10(3): pp 187 - 198.
- Augsburge AR. (1987). Hyperopia. In: Amos JF, ed. *Diagnosis and management in vision care*. Boston: Butterworths, 1987: pp 101 - 119.
- Awh E, Anllo-Vento L, Hillyard SA. (2000). The role of spatial selective attention in working memory for locations: Evidence from event-related potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience* 12: pp 840 – 847.
- Awh E, Jonides J, Smith EE, Buxton RB, Frank LR, Love T, Wong EC, Gmeindl L. (1999). Rehearsal in spatial working memory: Evidence from neuroimaging. *Psychological Science* 10(5): pp 433 - 437.
- Ayton LN, Abel LA, Fricke TR, McBrien NA. (2009). Developmental eye movement test: what is it really measuring? *Optometry and Vision Science* 86(6): pp 722 - 730.
- Backus BT, Fleet DJ, Parker AJ, Heeger DJ. (2001). Human cortical activity correlates with stereoscopic depth perception. *Journal of Neurophysiology* 86(4): pp 2054 - 2068.
- Baddeley AD, Della Sala S, Papagno C, Spinnler H. (1997). Dual-task performance in dysexecutive and nondysexecutive patients with a frontal lesion. *Neuropsychology* 11: pp 187 – 194.
- Baddeley, A. (1986). *Working Memory*. London: Oxford University Press.
- Bade A, Boas M, Gallaway M, Mitchell GL, Scheiman M, Kulp MT, Cotter SA, Rouse M; CITT Study Group. Relationship between clinical signs and symptoms of convergence insufficiency. *Optometry and Vision Science* 90(9): pp 988 - 995.
- Bando T, Ishihara A, Tsukahara N. (1978). The mode of cerebellar control of lens accommodation. In: Ito M, Tsukahara N, Kubota K, Yagi K, editors. *Integrative Control Functions of the Brain*. New York, New York: Kodansha Ltd, pp 149 - 150.
- Banich MT, Milham MP, Atchley RA, Cohen NJ, Webb A, Wszalek T. (2000). fMRI studies of Stroop tasks reveal unique roles of anterior and posterior brain systems in attentional selection. *Journal of Cognitive Neuroscience* 12: pp 988 – 1000.
- Banich MT, Milham MP, Atchley RA, Cohen NJ, Webb A, Wszalek T. (2000). Prefrontal regions play a predominant role in imposing an attentional ‘set’: evidence from fMRI. *Cognitive Brain Research* 10: pp 1 – 9.
- Banich MT, Milham MP, Jacobson BL, Webb A, Wszalek T, Cohen NJ. (2001). Attentional selection and the processing of task-irrelevant information: insights from fMRI examinations of the Stroop task. *Progress in Brain Research* 134: pp 459 – 470.
- Barch DM, Braver TS, Akbudak E, Conturo T, Ollinger J, Snyder A. (2001). Anterior cingulate cortex and response conflict: effects of response modality and processing domain. *Cerebral Cortex* 11: pp 837 – 848.
- Barkley RA. (1997). Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: Constructing a unifying theory of ADHD. *Psychological Bulletin* 121: pp 65 – 94.

- Barkovich AJ. (2000). Normal development of the neonatal and infant brain, skull, and spine. In: A.J. Barkovich (Ed.), *Pediatric neuroimaging*, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia PA (2000), pp 13 – 69.
- Barnhardt C, Cotter SA, Mitchell GL, Scheiman M, Kulp MT, CITT Study Group. (2012). Symptoms in children with convergence insufficiency: before and after treatment. *Optometry and Vision Science* 89(10): pp 1512 - 1520.
- Bassou L, Granie M, Pugh AK, Morucci JP (1992) [Binocular coordination during reading]. *Comptes Rendus de l Academie des Sciences. Serie III, Sciences de la Vie* 315:159-164.
- Becker W, Fuchs AF. (1969). Further properties of the human saccadic system: eye movements and correction saccades with and without visual fixation points. *Vision Research* 9: pp 1247 - 1258.
- Belknap DB, McCrea RA. (1988). Anatomical connections of the prepositus and abducens nuclei in the squirrel monkey. *Journal of Comparative Neurology* 268: pp 13 - 28.
- Bellebaum C, Daum I, Koch B, Schwarz M, Hoffmann KP. (2005). The role of the human thalamus in processing corollary discharge. *Brain* 128(5): pp 1139 - 1154.
- Bench CJ, Frith CD, Grasby PM, Friston KJ, Paulesu E, Frackowiak RSJ, Dolan RJ. (1993). Investigations of the functional anatomy of attention using the Stroop test. *Neuropsychologia* 31: pp 907 – 922.
- Benevento LA et Port JD. (1995). Single neurons with both form/color differential responses and saccade-related responses in the nonretinotopic pulvinar of the behaving macaque monkey. *Visual Neuroscience* 12(3): pp 523 - 544.
- Benjamin WJ, Borish IM. (2006). *Borish's clinical refraction*, 2nd ed. St. Louis: Butterworth Heinemann, 2006: pp 9 - 11.
- Bennett AG, Rabbetts RB. (1989). *Clinical Visual Optics*, 2nd ed. Boston: Butterworth/Heinemann.
- Berens C, Stark EK. (1932). Studies in ocular fatigue. III. Fatigue of accommodation: history, apparatus, and methods of graphic study. *American Journal of Ophthalmology* 15: pp 216 – 223.
- Best JR, Miller PH, Naglieri JA. (2011). Relations between Executive Function and Academic Achievement from Ages 5 to 17 in a Large, Representative National Sample. *Learning and Individual Differences* 21(4): pp 327 - 336.
- Bharadwaj SR, Candy TR. (2009). Accommodative and vergence responses to conflicting blur and disparity stimuli during development. *Journal of Vision* 9(11): pp 1-18.
- Bharadwaj SR, Schor CM. (2005). Acceleration characteristics of human ocular accommodation. *Vision Research* 45: pp 17 – 28.
- Bharadwaj SR, Schor CM. (2006). Dynamic control of ocular disaccommodation: First and second-order dynamics. *Vision Research* 46: pp 1019 – 1037.
- Bhidayasiri R, Plant GT, Leigh RJ. (2000). A hypothetical scheme for the brainstem control of vertical gaze. *Neurology* 54(10): pp 1985 - 1993.
- Birch EE, Salomao S. (1998). Infant random dot stereoacuity cards. *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus* 35: pp 86 – 90.
- Bisley J, Goldberg M. (2003). Neuronal activity in the lateral intraparietal area and spatial attention. *Science* 299: pp 81 – 86.
- Bisley JW, Goldberg M.E. (2010). Attention, intention, and priority in the parietal lobe. *Annual Review of Neuroscience* 33: pp 1 – 21.
- Biswal BB. (2010). Vision therapy in adults with convergence insufficiency: clinical and functional magnetic resonance imaging measures. *Optometry Vision Science* 87(12): pp 985 - 1002.

- Blair C, Razza RP. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in Kindergarten. *Child Development* 78: pp 647 – 663.
- Blika S. (1982). Ophthalmological findings in pupils of a primary school with particular reference to reading difficulties. *Acta Ophthalmologica (Copenhagen)* 60: pp 927 – 934.
- Blythe HI, Liversedge SP, Joseph HSSL, White SJ, Findlay JM, Rayner K. (2006). The binocular coordination of eye movements during reading in children and adults. *Vision Research* 46: pp 3898 – 3908.
- Booth JN, Boyle JME. (2009). The role of inhibitory functioning in children's reading skills. *Educational Psychology in Practice* 25(4): pp 339 - 350.
- Borish IM. (1970). *Clinical Refraction*, 3rd ed, p355. Chicago: Professional Press.
- Borsting E, Mitchell GL, Kulp MT, Scheiman M, Amster DM, Cotter S, et al. (2012). Improvement in academic behaviors after successful treatment of convergence insufficiency. *Optometry and Vision Science* 89(1): pp 12 – 18.
- Borsting E, Rouse M, Chu R. (2005). Measuring ADHD behaviors in children with symptomatic accommodative dysfunction or convergence insufficiency: a preliminary study. *Optometry* 76(10): pp 588 - 592.
- Borsting E, Rouse M, Deland P, Hovett S, Kimura D, Park M et al. (2003). Association of symptoms and convergence and accommodative insufficiency in school-age children. *Optometry* 74: pp 25 - 34.
- Borsting E, Rouse M, DeLand P. (1999). Prospective comparison of convergence insufficiency and normal binocular children on CIRS symptom surveys. Convergence Insufficiency and Reading Study (CIRS) group. *Optometry Vision Science* 76(4): pp 221 - 228.
- Borsting EJ, Rouse MW, Mitchell GL, et al. (2003). Validity and reliability of the revised convergence insufficiency symptom survey in children aged 9 to 18 years. *Optometry and Vision Science* 80(12): pp 832 – 838.
- Bosse ML, Tainturier MJ, Valdois S. (2007). Developmental dyslexia: the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition* 104: pp 198 – 230.
- Botvinick MM, Braver TS, Barch DM, Carter CS, Cohen JD. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review* 108 (3): pp 624 - 652.
- Botvinick MM, Cohen JD, Carter CS. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends in Cognitive Science* 8: pp 539 – 546.
- Bradley DC, Chang GC, Andersen RA. (1998). Encoding of three-dimensional structure-from-motion by primate area MT neurons. *Nature* 392: pp 714 – 717.
- Bradley DC, Qian N, Andersen RA. (1995). Integration of motion and stereopsis in middle temporal cortical area of macaques. *Nature* 373: pp 609 – 611.
- Brass M, Derrfuss J, Forstmann B, Cramon D. (2005). The role of the inferior frontal junction area in cognitive control. *Trends in Cognitive Science* 9: pp 314 – 316.
- Brass M, Ullsperger M, Knoesche TR, Cramon DY, Phillips NA. (2005). Who comes first? The role of the prefrontal and parietal cortex in cognitive control. *Journal of Cognitive Neuroscience* 17 (9): pp 1367 – 1375.
- Braun D, Weber H, Mergner T, Schulte-Mönting J. (1992). Saccadic reaction times in patients with frontal and parietal lesions *Brain* 115(5): pp 1359 - 1386.
- Brautaset RL, Jennings AJ. (2006). Effects of orthoptic treatment on the CA/C and AC/A ratios in convergence insufficiency. *Investigative Ophthalmology and Vision Science* 47(7): pp 2876 – 2880.

- Braver TS, Cohen JD, Nystrom LE, Jonides J, Smith EE, Noll DC. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *Neuroimage* 5: pp 49 – 62.
- Brown GG, Kinderman S, Siegle GJ, Granholm E, Wong EC, Buxton RB. (1998). Brain activation and pupil response during overt performance of the Stroop color word task. *Journal of the International Neuropsychological Society* 5: pp 308 – 319.
- Bucci MP, Gomes M, Paris S, Kapoula Z. (2001). Disconjugate oculomotor learning caused by feeble image-size inequality: Differences between secondary and tertiary positions. *Vision Research* 41: pp 625 – 637.
- Bucci MP, Kapoula Z, Bremond-Gignac D, Wiener-Vacher S. (2006). Binocular coordination of saccades in children with vertigo: Dependency on the vergence state. *Vision Research* 46: pp 3594 – 3602.
- Bucci MP, Kapoula Z, Brémond-Gignac D. (2008). Poor binocular coordination of saccades in dyslexic children. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* 246(3): pp 417 – 428.
- Bucci MP, Kapoula Z, Bui-Quoc E, Bouet A, Wiener-Vacher S. (2011). Saccades and vergence performance in a population of children with vertigo and clinically assessed abnormal vergence capabilities. *PLoSOne* 6: e23125.
- Bucci MP, Kapoula Z, Yang Q, Bremond-Gignac D, Wiener-Vacher S. (2004). Speed-accuracy of saccades, vergence and combined eye movements in children with vertigo. *Experimental Brain Research* 157: pp 286 – 295.
- Bucci MP, Kapoula Z. (2006). Binocular coordination of saccades in 7 years old children in single word reading and target fixation. *Vision Research* 46(4): pp 457 – 466.
- Bucci MP, Pouvreau N, Yang Q, Kapoula Z. (2005). Influence of gap and overlap paradigms on saccade latencies and vergence eye movements in seven-year-old children. *Experimental Brain Research* 164 : pp 48 - 57.
- Buffalo EA, et al. (2010). A backward progression of attentional effects in the ventral stream. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107: pp 361 – 365.
- Bull R, Espy KA, Wiebe SA. (2008). Short-term memory, working memory, and executive functioning in preschoolers: Longitudinal predictors of mathematical achievement at age 7 years. *Developmental Neuropsychology* 33: pp 205 – 228.
- Bull R, Scerif G. (2001). Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology* 19: pp 273 – 293.
- Burgess PW, Shallice T (1996a) Bizarre responses, rule detection and frontal lobe lesions. *Cortex* 32: pp 241 – 259.
- Burgess PW, Shallice T (1996b) Response suppression, initiation and strategy use following frontal lobe lesions. *Neuropsychologia* 34: pp 263 – 273.
- Burgess PW, Simons JS. (2005). Theories of frontal lobe executive function: clinical applications. In: Halligan, PW.; Wade, DT., editors. *Effectiveness of Rehabilitation for Cognitive Deficits*. Oxford Univ. Press; New York: p. 211-31.
- Burgess PW, Veitch E, De lacy Costello A, Shallice T. (2000). The cognitive and neuroanatomical correlates of multi-tasking. *Neuropsychologia* 38: pp 848 – 863.
- Burian NM. (1971). Anomalies of the convergence and divergence functions and their treatment. *Transactions of the New Orleans Academy Ophthalmology* 1971 : pp 223 - 232.
- Buschman T, Miller E. (2007) Top-down versus bottom-up control of attention in the prefrontal and posterior parietal cortices. *Science* 315: pp 1860 – 1862.

- Busetтини C, Davison RC, Gamlin PDR. (2007). The near triad: vergence, accommodation, and pupilloconstriction. In: Squire L, editor., editor. *New Encyclopedia of Neuroscience*. Oxford: Elsevier.
- Busetтини C, Mays LE. (2003). Pontine omnipause activity during conjugate and disconjugate eye movements in macaques. *Journal of Neurophysiology* 90: pp 3838 – 3853.
- Busetтини C, Mays LE. (2005). Saccade-vergence interactions in macaques. II. Vergence enhancement as the product of a local feedback vergence motor error and a weighted saccadic burst. *Journal of Neurophysiology* 94: pp 2312 - 2330.
- Bush G et al. (1999) Anterior cingulate cortex dysfunction in attention deficit/hyperactivity disorder revealed by fMRI and the counting Stroop. *Biological Psychiatry* 45: pp 1542 – 1552.
- Bush G, Luu P, Posner MI. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences* (6): pp 215 - 222.
- Bush G, Whalen PJ, Rosen BR, Jenike MA, McInerney SC, Rauch SL. (1998). The counting Stroop: An interference task specialized for functional neuroimaging. Validation study with functional MRI. *Human Brain Mapping* 6: pp 270 – 282.
- Bush G. (2011). Cingulate, Frontal and Parietal Cortical Dysfunction in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Biological Psychiatry* 69(12): pp 1160 – 1167.
- Buttner-Ennever JA, Buttner U. (1978). A cell group associated with vertical eye movements in the rostral mesencephalic reticular formation of the monkey. *Brain Research* 151: pp 31 - 47.
- Buttner-Ennever JA, Cohen B, Pause M, Fries W. (1988). Raphe nucleus of the pons containing omnipause neurons of the oculomotor system in the monkey, and its homologue in man. *Journal of Comparative Neurology* 267: pp 307 - 321.
- Buzzelli AR. (1986). Vergence facility: developmental trends in a school age population. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 63: pp 351 - 355.
- Cabeza R, Nyberg L. (2000). Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *Journal of Cognitive Neuroscience* 12: pp 1 – 47.
- Cacho-Martínez P, García-Muñoz Á, Ruiz-Cantero MT. (2010). Do we really know the prevalence of accommodative and nonstrabismic binocular dysfunctions? *Journal of Optometry* 3(4): pp 185 – 197.
- Cacho-Martínez P, García-Muñoz Á, Ruiz-Cantero MT. (2014). Is there any evidence for the validity of diagnostic criteria used for accommodative and nonstrabismic binocular dysfunctions? *Journal of Optometry* 7: pp 2 – 21.
- Cain K. (2006). Individual differences in children's memory and reading comprehension: an investigation of semantic and inhibitory deficits. *Memory* 14(5) : pp 553 - 569.
- Calkins DJ. (2000). Representation of cone signals in the primate retina. *Journal of the Optical Society of America* 17 (3): pp 597 – 606.
- Campbell FW, Robson JG, Westheimer G (1959). Fluctuations of accommodation under steady viewing conditions. *Journal of Physiology*. 145: pp 579-594.
- Campbell FW, Westheimer G (1959). Factors influencing accommodative response of the human eye. *Journal of Optical Society of America*. 49: pp 569-571.
- Campbell FW. (1957). The depth of field of the human eye. *Optica Acta* ; 4: 157– 64.
- Cannon SC, Robinson DA. (1985). An improved neural-network model for the neural integrator of the oculomotor system: more realistic neuron behavior. *Biological Cybernetics* 53(2): pp 93 - 108.
- Capobianco NM. (1953). Symposium: convergence insufficiency; incidence and diagnosis. *American Orthoptic Journal* 3: pp 13 - 17.

- Carter CS, Mintun M, Cohen JD. (1995). Interference and facilitation effects during selective attention: An H2 15O PET study of Stroop task performance. *Neuroimage* 2: pp 264 – 272.
- Carter CS, Van Veen V. (2007). Anterior cingulate cortex and conflict detection: an update of theory and data. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience* 7: pp 367 – 379.
- Castanes MS. (2003). Major review: the underutilization of vision screening (for amblyopia, optical anomalies and strabismus) among preschool age children. *Binocular Vision & Strabismus Quarterly* 18: pp 217 - 232.
- Chan RCK, Hoosain R, Lee TMC, Fan YW, Fong DTS. (2003). Are there subtypes of attentional deficits in patients with persisting postconcussive complaints? A cluster analytical study. *Brain Injury* 17(2): pp 131 – 148.
- Chan RCK. (2001). Dysexecutive symptoms among the non-clinical sample: A study with the use of the Dysexecutive Questionnaire. *British Journal of Psychology* 92(3): pp 551 – 565.
- Chan RCK. (2002). Attentional deficits in patients with persisting postconcussive complaints: General deficit or specific component deficits? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology* 24(8): pp 1081 – 1093.
- Charman WN, Whitefoot H. (1977). Pupil diameter and the depth-of-field of the human eye as measured by the laser speckle. *Optica Acta*, 24, pp. 1211-1216
- Charman WN, Heron G (1988). Fluctuations in accommodation: a review. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 8: pp 153-164.
- Chaturvedi V, van Gisbergen JA. (2000). Stimulation in the rostral pole of monkey superior colliculus: effects on vergence eye movements. *Experimental Brain Research* 132: pp 72 - 78.
- Chee MWL, Sriram N, Siong Soon C, Ming Lee K. (2000). Dorsolateral prefrontal cortex and the implicit association of concepts and attributes. *Neuroreport* 11: pp 135 – 140.
- Chelazzi L, Corbetta M. (2000). Cortical mechanisms of visuospatial attention in the primate brain. In *The New Cognitive Neurosciences* (M. S. Gazzaniga, Ed.), 2nd ed., pp. 667–686. The MIT Press, Cambridge, MA.
- Cicerone CM, Nerger JL. (1989). The relative numbers of long-wavelength-sensitive to middle-wavelength-sensitive cones in the human fovea centralis. *Vision Research* 29 (1): pp 115-128.
- Ciuffreda KJ (1991). Accommodation and its anomalies. In Charman (Eds): *Vision and visual dysfunctions*, vol 1, pp 231-279. London: Macmillan Press.
- Ciuffreda KJ, Kruger PB (1988). Dynamics of human voluntary accommodation. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 65: pp 365-370
- Ciuffreda KJ, Tannen B. (1995). *Eye movement basics for the clinician*, p 58, 140, 141. St. Louis, CV Mosby.
- Ciuffreda KJ. (1991). Accommodation and its anomalies. In Charman WN (Ed), *Vision and Visual Dysfunction*, vol 1, pp 231 – 279. London: Macmillan Press.
- Ciuffreda KJ. (2002). The scientific basis for an efficacy of optometric vision therapy in nonstrabismic accommodative and vergence disorders. *Optometry* 73: pp 735 – 762.
- Clarke RJ, Coimbra CJP, Alessio ML. (1985). Distribution of parasympathetic motoneurons in the oculomotor complex innervating the ciliary ganglion in the marmoset (*Callithrix jacchus*). *Acta Anatomica* 121: pp 53 - 58.
- Clifton C, Ferreira F, Henderson JM, Inhoff AW, Liversedge SP, Reichle ED, Schotter ER. (2016). Eye movements in reading and information processing: Keith Rayner's 40 year legacy. *Journal of Memory and Language* 86: pp 1 - 19.
- Cline D, Hofstetter HW, Griffin JR (Eds). (1989). *Dictionary of visual science*, 4th ed., p 80. Radnor, PA : Chilton.

- Cohen JD, Dunbar K, McClelland JL. (1990). On the control of automatic processes: a parallel distributed processing account of the Stroop effect. *Psychological Review* 97(3): pp 332 - 361.
- Cohen JD, Perlstein WM, Braver TS, Nystrom LE, Noll DC, Jonides J, Smith EE. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature* 386: pp 604 – 607.
- Cohen L, Dehaene S, Naccache L, Lehericy S, Dehaene-Lambertz G, Henaff MA, Michel F. (2000). The visual word form area: Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain* 123: pp 291 – 307.
- Cohen Y, Segal O, Barkana Y, Lederman R, Zadok D, Pras E, Morad Y. (2010). Correlation between asthenopic symptoms and different measurements of convergence and reading comprehension and saccadic fixation eye movements. *Optometry* 81(1): pp 28 - 34.
- Collette F, Van der Linden M, Delfiore G, Degueldre C, Luxen A, Salmon E. (2001). The functional anatomy of inhibition processes investigated with the Hayling task. *Neuroimage* 14: pp 258 – 267.
- Collewijn H, Erkelens CJ, Steinman RM. (1988a). Binocular co-ordination of human horizontal saccadic eye movements. *Journal of Physiology* 404: pp 157 – 182.
- Collewijn H, Erkelens CJ, Steinman RM. (1988b). Binocular co-ordination of human vertical saccadic eye movements. *Journal of Physiology* 404: pp 183 - 197.
- Collewijn H, Erkelens CJ, Steinman RM. (1995). Voluntary binocular gaze-shifts in the plane of regard: dynamics of version and vergence. *Vision research* 35: pp 3335 – 3358.
- Collewijn H, Erkelens CJ, Steinman RM. (1997). Trajectories of the human binocular fixation point during conjugate and non-conjugate gaze-shifts. *Vision Research* 37: pp 1049 - 1069.
- Collins A, Koechlin E. (2012). Reasoning, learning, and creativity: frontal lobe function and human decisionmaking. *PLoS Biology* 10:e1001293.
- Connors C. (1997). Manual for Connors' Rating Scales Toronto: Multi-Health Systems.
- Constantinidis C, Procyk E. (2004). The primate working memory networks. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience* 4(4): pp 444 - 465.
- Constantinidis C, Williams GV, Goldman-Rakic P. (2002). A role for inhibition in shaping the temporal flow of information in prefrontal cortex. *Nature Neuroscience* 5: pp 175 – 180.
- Constantinidis C. (2006). Posterior parietal mechanisms of visual attention. *Reviews in the neurosciences* 17(4): pp 415 – 427.
- Convergence Insufficiency Treatment Trial (CITT) Study Group. The convergence insufficiency treatment trial: design, methods, and baseline data. *Ophthalmic Epidemiol.* 2008 Jan-Feb;15(1): pp 24 - 36.
- Convergence Insufficiency Treatment Trial Study Group. CITTTS. Randomized clinical trial of treatments for symptomatic convergence insufficiency in children. *Archives of Ophthalmology* 2008; 126(10): pp 1336 - 1349.
- Convergence Insufficiency Treatment Trial Study Group. Long-term effectiveness of treatments for symptomatic convergence insufficiency in children. *Optometry and Vision Science* 2009 Sep; 86(9): pp 1096 - 1103.
- Cooper J, Duckman R. (1978). Convergence insufficiency: incidence, diagnosis, and treatment. *Journal of the Optical Society of America* 49: pp 673 - 680.
- Cooper J, Feldman J. (2009). Reduction of symptoms in binocular anomalies using computerized home therapy-HTS. *Optometry.* 80: pp 481 - 486.

- Cooper J, Jamal N. (2012). Convergence insufficiency-a major review. *Optometry* 83(4): pp 137 - 158. Review.
- Cooper J, Selenow A, Ciuffreda KJ, Feldman J, Faverty J, Hokoda SC, Silver J. (1983). Reduction of asthenopia in patients with convergence insufficiency after fusional vergence training. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 60: pp 982 – 989.
- Cooper J. (1992). Clinical implications of vergence adaptation. *Optometry and Vision Science* 69(4): pp 300 - 307. Review.
- Cooper JS, Burns CR, Cotter SA, Daum KM, Griffin JR, Scheiman MM. (2011). Care of the patient with accommodative and vergence dysfunction. *American Optometric Association*, 2011
- Corbetta M, Akbudak E, Conturo TE, Snyder AZ, Ollinger JM, Drury HA, Linenweber MR, Petersen SE, Raichle ME, Van Essen DC, Shulman GL. (1998). A common network of functional areas for attention and eye movements. *Neuron* 21(4): pp 761 - 773.
- Corbetta M, Shulman GL. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience* 3: pp 201–215.
- Cormack LK, Stevenson SB, Schor CM. (1989). The influence of changing size on accommodation and vergence. *Investigative Ophthalmology & Visual Science (Suppl)* 30: p 135.
- Coubard O, Daunys G, Kapoula Z. (2004). Gap effects on saccade and vergence latency. *Experimental Brain Research* 154: pp 368 - 381.
- Coubard O, Kapoula Z, Müri R, Rivaud-Péchox S. (2003). Effects of TMS over the right prefrontal cortex on latency of saccades and convergence. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 44(2): pp 600 - 609.
- Coubard OA. (2013). Saccade and vergence eye movements: a review of motor and premotor commands. *European Journal of Neuroscience* 38(10): pp 3384 – 3397.
- Coulthard EJ, Nachev P, Husain M. (2008). Control over conflict during movement preparation: role of posterior parietal cortex. *Neuron* 58: pp 144 – 157.
- Cowey CM, Green S. (1996). The hippocampus: A “working memory” structure? The effect of hippocampal sclerosis on working memory. *Memory* 4: pp 19 – 30.
- Crawford JD, Cadera W, Vilis T. (1991). Generation of torsional and vertical eye position signals by the interstitial nucleus of Cajal. *Science* 252: pp 1551 - 1553.
- Crawford K, Terasawa E, Kaufman PL. (1989). Reproducible stimulation of ciliary muscle contraction in the cynomolgus monkey via a permanent indwelling midbrain electrode. *Brain Research* 503: pp 265 - 272.
- Cullen KE, van Horn MR. (2011). The neural control of fast vs. slow vergence eye movements. *European Journal of Neuroscience* 33(11): pp 2147 – 2154.
- Dacey DM, Lee BB. (1994). The 'blue-on' opponent pathway in primate retina originates from a distinct bistratified ganglion cell type. *Nature* 367 (6465): pp 731 – 735.
- Dalziel CC. (1981). Effect of vision training on patients who fail Sheard’s criterion. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 58: pp 21 – 23.
- Damasio AR. (1995). Toward a neurobiology of emotion and feeling: Operational concepts and hypotheses. *The Neuroscientist* 1(1): pp 19 – 25.
- Daniel F, Kapoula Z. (2016). Binocular Vision and the Stroop Test. *Optometry and Vision Science* 93(2): pp 194 - 208.
- Daniel F, Kapoula Z. (2017) Impact of induced vergence/accommodation conflict on reading saccades and cognition. *Journal of Vision*, Under press
- Daniel F, Morize A, Bremond-Gignac D, Kapoula Z. (2016). Benefits from vergence rehabilitation: evidence for improvement of reading saccades and fixations. *Frontiers in Integrative Neurosciences* 20: pp 10 - 33.

- Daum KM. (1982). The course and effect of visual training on the vergence system. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 59: pp 223 – 227.
- Daum KM. (1983). Accommodative dysfunction. *Documenta Ophthalmologica* 55: pp 177 – 198.
- Davies C. (1946). Orthoptic treatment in convergence insufficiency. *Canadian M.J.A.* 55: pp 47 - 49.
- DeAngelis GC, Cumming BG, Newsome WT. (1998). Cortical area MT and the perception of stereoscopic depth. *Nature* 394(6694): pp 677 - 680.
- Debray P, Debray Q, Binoche T, Nebout MC. (1972). An advance in leximetry: proportional assessment of the Alouette test. *Revue de Neuropsychiatrie de l'Enfance* 20 : pp 725 – 732.
- Dehaene S, Cohen L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences* 15(6): pp 254 - 262.
- Dehaene S, Le Clec'H G, Poline JB, Le Bihan D, Cohen L. (2002). The visual word form area: a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport* 13(3-4): pp 321 – 325.
- Dehaene S. (2007). Les neurones de la lecture. Edition: Odile Jacob.
- DeLuca M, DiPace E, Judica A, Spinelli D, Zoccolotti P. (1999). Eye movement patterns in linguistic and non-linguistic tasks in developmental surface dyslexia. *Neuropsychologia* 37: pp 1407 – 1420.
- Desimone R, Duncan J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual review of neuroscience* 18: pp 193 – 222.
- Devinsky O et al. (1995). Contributions of anterior cingulate cortex to behaviour. *Brain* 118: pp 279 – 306.
- Diamond A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology* 64: pp 135 - 168.
- Donders FC. (1864). *On the Anomalies of Accommodation and Refraction of the Eye* (translated by Moore WD). London : The New Sydenham Society.
- Doricchi F, Perani D, Incoccia C, Grassi F, Cappa SF, Bettinardi V, Galati G, Pizzamiglio L, Fazio F. (1997). Neural control of fast-regular saccades and antisaccades: an investigation using positron emission tomography. *Experimental Brain Research* 116(1): pp 50 - 62.
- Dragomir M, Truş L, Chirilă D, Stîngu C. (2001). Orthoptic treatment efficiency in convergence insufficiency treatment. *Oftalmologia* 53(3): pp 66 - 69.
- Drevets WC, Raichle ME. (1998). Reciprocal suppression of regional cerebral blood flow during emotional versus higher cognitive processes: implications for interactions between emotion and cognition. *Cognition Emotion* 12: pp 353 – 385.
- Duane A. (1897). A new classification of motor anomalies of the eye based upon physiological principles. Publisher New York : J.H. Vail. pp 247 - 260.
- Duane A. (1922). Studies in monocular and binocular accommodation with their clinical implications. *American Journal of Ophthalmology* 5(Series 3): pp 865 – 877.
- Duane A. (1925). Subnormal accommodation. *Transactions of the American Ophthalmological Society* 23: pp 159 – 183.
- Duckworth AL, Seligman ME. (2005). Self-discipline outdoes IQ in predicting academic performance of adolescents. *Psychological Science* 16(12): pp 939 - 944.
- Duke-Elder S. (1949). The practice of refraction, 5th ed. St. Louis: CV Mosby, pp 141-151.
- Duke-Elder S. (1973). System of ophthalmology. London: Henry Kimpton.
- Duncan J, Owen AM. (2000). Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands. *Trends in Neuroscience* 23: pp 475 – 483.
- Duncan J, Seitz RJ, Kolodny J, Bor D, Herzog H, Ahmed A, et al. (2000). A neural basis for general intelligence. *Science* 289: pp 457 – 460.

- Duncan J. (1986). Disorganization of behaviour after frontal lobe damage. *Cognitive Neuropsychology* 2: pp 271 – 290.
- Duncan J. (1995). Attention, intelligence and the frontal lobes. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences* (pp. 721–733). Cambridge, MA: MIT Press.
- Dusek W, Pierscionek BK, McClelland JF. (2010). A survey of visual function in an Austrian population of school-age children with reading and writing difficulties. *BMC Ophthalmology* : pp 10 - 16.
- Dusek WA, Pierscionek BK, McClelland JF. (2011). An evaluation of clinical treatment of convergence insufficiency for children with reading difficulties. *BMC Ophthalmology* 11: pp 21 – 30.
- Dwyer P. (1992). The prevalence of vergence accommodation disorders in a school-age population. *Clinical and Experimental Optometry* 75: pp 10 - 18.
- Dysli M, Vogel N, Abegg M. (2014). Reading performance is not affected by a prism induced increase of horizontal and vertical vergence demand. *Frontiers in Human Neuroscience* 8: p 431.
- Eadie AS, Carlin PJ. (1995). Evolution of control system models of ocular accommodation, vergence and their interaction. *Medical and Biological Engineering Computing*. Jul;33(4):517-24. Review.
- Eames TH. (1934). Low fusion convergence as a factor in reading disability. *American Journal of Ophthalmology* 17: pp 709 - 710.
- Eames TH. (1955). The influence of hypermetropia and myopia on reading achievement. *American Journal of Ophthalmology* 39(3): pp 375 - 377.
- Eames TH. (1961). Accommodation in school children. *American Journal of Ophthalmology* 51: pp 1253 – 1257.
- Eggert T, Kapoula Z. (1995). Position dependency of rapidly induced saccade disconjugacy. *Vision Research* 35: pp 3493 – 3503.
- Egner T, Hirsch J. (2005). The neural correlates and functional integration of cognitive control in a Stroop task. *Neuroimage* 24: pp 539 – 547.
- Ehrlich K, Rayner K. (1983). Pronoun assignment and semantic integration during reading: Eye movements and immediacy of processing. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 22: pp 75 – 87.
- Elkington PT, Kerr GK, Stein JS. (1992). The effect of electromagnetic stimulation of the posterior parietal cortex on eye movements. *Eye* 6 (Pt 5): pp 510 - 514.
- Engbert R. (2006). Microsaccades : A microcosm for research on oculomotor control, attention and visual perception. *Progress in Brain Research* 154: pp177 - 192.
- Enright JT. (1984). Changes in vergence mediated by saccades. *Journal of Physiology* 350: pp 9-31.
- Erkelens CJ, Regan D. (1986). Human ocular vergence movements induced by changing size and disparity. *The Journal of Physiology* 379: pp 145 – 169.
- Erkelens CJ. (1987). Adaptation of ocular vergence to stimulation with large disparities. *Experimental Brain Research* 66: pp 507 – 516.
- Erkelens CJ1, Steinman RM, Collewijn H. (1989). Ocular vergence under natural conditions. II. Gaze shifts between real targets differing in distance and direction. *Proceedings of the Royal Society of London B Biol Sci* 236(1285): pp 441 - 465.
- Espy KA. (2004). Using developmental, cognitive, and neuroscience approaches to understand executive control in young children. *Developmental Neuropsychology* 26: pp 379 – 384.
- Evans JR. (2002). *Pickwell's binocular vision anomalies*. London: Butterworth.
- Everatt J, Warner J, Miles TR. (1997). The incidence of Stroop interference in dyslexia. *Dyslexia* 3: pp 222 – 228.

- Everett J, Lajeunesse C. (2000). Cognitive inhibition and psychopathology: toward a less simplistic conceptualization. *Encephale* 26(2): pp 13 - 20.
- Fawcett SL, Wang YZ, Birch EE. (2005). The Critical Period for Susceptibility of Human Stereopsis. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 46(2): pp 521 - 525.
- Fecteau J, Munoz D. (2006) Saliency, relevance, and firing: a priority map for target selection. *Trends in Cognitive Sciences* 10: pp 382 – 390.
- Fincham EF, Walton J. (1957). The reciprocal actions of accommodation and convergence. *The Journal of Physiology* 137: pp 488–508.
- Fink GR, Halligan PW, Marshall JC, Frith CD, Frackowiak RSJ, Dolan RJ. (1997). Neural mechanisms involved in the processing of global and local aspects of hierarchically organized visual stimuli. *Brain* 120: pp 1779 – 1791.
- Fioravanti F, Inchingolo P, Pensiero S, Spanio M. (1995). Saccadic eye movement conjugation in children. *Vision Research* 35: pp 3217 - 3228.
- Fischer B, Hartnegg K. (2000). Effects of visual training on saccade control in dyslexia. *Perception* 29: pp 531 – 542.
- Fischer B, Ramsperger E. (1984). Human express saccades: extremely short reaction times of goal directed eye movements. *Experimental Brain Research* 57(1): pp 191 - 195.
- Fischer B, Ramsperger E. (1986). Human express saccades: effects of randomization and daily practice. *Experimental Brain Research* 64(3): pp 569 - 578.
- Fliss R, Lemerre M, Mollard A. (2016). Performances on a cognitive theory of mind task: specific decline or general cognitive deficits? Evidence from normal aging. *Geriatric et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillissement* 14(2): pp 221 - 230.
- Ford KA, Goltz HC, Brown MR, Everling S. (2005). Neural processes associated with antisaccade task performance investigated with event-related fMRI. *Journal of Neurophysiology* 94(1): pp 429 - 440.
- Fowler S, Munro N, Richardson A, Stein J. (1989). Vergence control in patients with lesions of the posterior parietal cortex. *Journal of Physiology (London)* 417, 92p.
- Freedman DJ, Riesenhuber M, Poggio T, Miller EK. (2001). Categorical representation of visual stimuli in the primate prefrontal cortex. *Science* 291(5502): pp 312 - 316.
- Friedman NP, Miyake A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions: a latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General* 133(1): pp 101 - 135.
- Fukushima J, Akao T, Takeichi N, Kurkin S, Kaneko CR, Fukushima K. (2004). Pursuit-related neurons in the supplementary eye fields: discharge during pursuit and passive whole body rotation. *Journal of Neurophysiology* 91(6): pp 2809 - 2825.
- Fukushima K, Yamanobe T, Shinmei Y, Fukushima J, Kurkin S, Peterson BW. (2002). Coding of smooth eye movements in three-dimensional space by frontal cortex. *Nature* 419(6903): pp 157 - 162.
- Fukushima K, Yamanobe T, Shinmei Y, Fukushima J, Kurkin S. (2004). Role of the frontal eye fields in smooth-gaze tracking. *Progress in Brain Research* 143: pp 391 - 401.
- Funahashi S, Bruce CJ, Goldman-Rakic PS. (1989). Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. *Journal of Neurophysiology* 61(2): pp 331 – 349.
- Fuster JM, Alexander GE. (1971). Neuron activity related to short-term memory. *Science* 173(3997): pp 652 - 654.
- Fuster JM, Bauer RH, Jervey JP. (1985). Functional interactions between inferotemporal and prefrontal cortex in a cognitive task. *Brain Research* 330(2): pp 299 - 307.
- Gaertner C, Bucci MP, Ajrezo L, Wiener-Vacher S. (2013). Binocular coordination of saccades during reading in children with clinically assessed poor vergence capabilities. *Vision Research* 87: pp 22 - 29.

- Gaertner C. (2014). Développement des saccades verticales et de la posture en interaction avec la vergence chez des enfants sains de 6 à 17 ans et chez des enfants avec strabisme. Thèse de doctorat en neurosciences cognitives. Sous la direction de Z. Kapoula et T. Van Den Abbeele.
- Gall R, Wick B, Bedell H. (1998). Vergence facility: establishing clinical utility. *Optometry and Vision Science* 75: pp 731 - 742.
- Gamlin PD, Gnatd JW, Mays LE. (1989). Lidocaine-induced unilateral internuclear ophthalmoplegia : effects on convergence and conjugate eye movements. *Journal of Neurophysiology* 62 : pp 82 – 95.
- Gamlin PD, Mays LE. (1992). Dynamic properties of medial rectus motoneurons during vergence eye movements. *Journal of Neurophysiology* 67: pp 64-74.
- Gamlin PD, Reiner A. (1991). The edinger-westphal nucleus—sources of input influencing accommodation, pupilloconstriction, and choroidal blood-flow. *Journal of Comparative Neurology* 306: pp 425 - 438.
- Gamlin PD, Yoon K, Zhang H. (1996). The role of cerebro-ponto-cerebellar pathways in the control of vergence eye movements. *Eye* 10 (Pt 2): pp 167 - 171.
- Gamlin PD, Yoon K. (2000). An area for vergence eye movement in primate frontal cortex. *Nature* 407: pp 1003 - 1007.
- Gamlin PD. (1999). Subcortical neural circuits for ocular accommodation and vergence in primates. *Ophthalmic and Physiological Optics* 19(2): pp 81 - 89.
- Gamlin PDR, Clarke RJ. (1995). Single-unit activity in the primate nucleusreticularis tegmenti pontis related to vergence and ocular accommodation. *Journal of Neurophysiology* 73: pp 2115 - 2119.
- Gamlin PDR, Zhang YH, Clendaniel RA, Mays LE. (1994). Behavior of identified edinger-westphal neurons during ocular accommodation. *Journal of Neurophysiology* 72: pp 2368 - 2382.
- Gamlin PDR. (2002). Neural mechanisms for the control of vergence eye movements. *Annals of the New York Academy of Sciences* 956: pp 264 - 272.
- Garavan H, Stein EA. (1999). Right hemispheric dominance of inhibitory control: An event-related functional MRI study. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96: pp 8301 – 8306.
- García-Muñoz Á, Carbonell-Bonete S, Cantó-Cerdán M, Cacho-Martínez P. (2016). Accommodative and binocular dysfunctions: prevalence in a randomised sample of university students. *Clinical and Experimental Optometry* 99(4): pp 313 - 321.
- Garzia R. (1994). The relationship between visual efficiency problem and learning. In: Scheiman M, ed. *Optometric Management of Learning Related Vision Problems*. St. Louis: Mosby; 1994.
- Garzia RP, Nicholson SB, Gaines CS, Murphy MA, Kramer A, Potts J. (1989). Effects of nearpoint visual stress on psycholinguistic processing in reading. *Journal of the American Optometric Association* 60(1): pp 38 - 44.
- Garzia RP, Richman JE, Nicholson SB, et al. (1990). A new visual-verbal saccade test: the Developmental Eye Movement test (DEM). *Journal of the American Optometric Association* 61: pp 124 - 135.
- Garzia RP. (1993). Optometric factors in reading disability. In: Willows DM, Kruk R, Corcos E, eds. *Visual processes in reading and reading disabilities*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1993.
- Gaymard B, Ploner CJ, Rivaud S, Vermersch AI, Pierrot-Deseilligny C. (1998). Cortical control of saccades. *Experimental Brain Research* 123: pp 159 - 163.
- Gaymard B. (2012). Cortical and sub-cortical control of saccades and clinical application. *Revue Neurologique (Paris)* 168(10): pp 734 - 740.

- Genovesio A, Ferraina S. (2004). Integration of retinal disparity and fixation-distance related signals toward an egocentric coding of distance in the posterior parietal cortex of primates. *Journal of Neurophysiology* 91(6): pp 2670 - 2684.
- George J, Greenfield D. (2005). Examination of a structured problem-solving flexibility task for assessing approaches to learning in young children: Relation to teacher ratings and children's achievement. *Journal of Applied Developmental Psychology* 26(1): pp 69 – 84.
- George MS, Ketter TA, Parekh PI, Rosinsky N, Ring H, Casey BJ, Trimble MR, Horwitz B, Herscovitch P, Post RM. (1994). Regional brain activity when selecting a response despite interference: An H2 (15) O PET study of the stroop and an emotional stroop. *Human Brain Mapping* 1(3): pp 194 - 209.
- Gilmartin B. (1986). A review of the role of sympathetic innervation of the ciliary muscle in ocular accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics* 6: pp 23 - 37.
- Gnadt JW, Mays LE. (1995). Neurons in monkey parietal area LIP are tuned for eye-movement parameters in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology* 73: pp 280 - 297.
- Goldberg E, Bougakov D. (2005). Neuropsychologic assessment of frontal lobe dysfunction. *Psychiatric Clinics of North America* 28(3): pp 567 - 580, 578- 579. Review.
- Golden CJ. (1975). A group version of the Stroop Color and Word Test. *Journal of Personality Assessment* 39: pp 386 - 388.
- Goldman-Rakic PS. (1988). Topography of cognition: parallel distributed networks in primate association cortex. *Annual Review of Neuroscience* 11: pp 137 – 156.
- Goss DA. (1995). Ocular accommodation, convergence, and fixation disparity: a manual of clinical analysis. 2nd ed. Newton, MA: Butterworth-Heinemann; 1995.
- Gottlieb J. (2007). From thought to action: the parietal cortex as a bridge between perception, action, and cognition. *Neuron* 53: pp 9 – 16.
- Gouras P. (1992). Retinal circuitry and its relevance to diagnostic psychophysics and electrophysiology. *Current Opinion in Ophthalmology* 3: pp 803 – 812.
- Grafman J, Litvan I. (1999). Importance of deficits in executive functions. *The Lancet* 354: pp 1921 – 1923.
- Granet DB, Gomi CF, Ventura R, Miller-Scholte A. (2005). The relationship between convergence insufficiency and ADHD. *Strabismus* 13: pp 163 – 168.
- Griffin JR. (1987). Efficacy of vision therapy for nonstrabismic vergence anomalies. *American Journal of Optometry and Physiology Optics* 64: pp 411 – 414.
- Grisham JD, Powers M, Riles P. (2007). Visual skills of poor readers in high school. *Optometry* 78(10): pp 542 - 549.
- Grisham JD, Sheppard MM, Tran WU. (1993). Visual symptoms and reading performance. *Optometry and Vision Science* 70(5): pp 384 - 391.
- Grosbras MH, Lobel E, Van de Moortele PF, LeBihan D, Berthoz A. (1999). An anatomical landmark for the supplementary eye fields in human revealed with functional magnetic resonance imaging. *Cerebral Cortex* 9(7): pp 705 - 711.
- Grosvenor T. (2007). Primary Care Optometry, Butterworth-Heinemann.
- Gruber SA, Rogowska J, Holcomb P, Soraci S, Yurgelun-Todd D. (2002). Stroop performance in normal control subjects: an fMRI study. *Neuroimage* 16(2): pp 349 - 360.
- Guitton D, Buchtel HA, Douglas RM. (1985). Frontal lobe lesions in man cause difficulties in suppressing reflexive glances and in generating goal-directed saccades. *Experimental Brain Research* 58: pp 455 - 472.

- Gulyás BI, Roland PE. (1994). Binocular disparity discrimination in human cerebral cortex: functional anatomy by positron emission tomography. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 91(4): pp 1239 - 1243.
- Gurd JM, Amunts K, Weiss PH, Zafiris O, Zilles K, Marshall JC, Fink GR. (2002). Posterior parietal cortex is implicated in continuous switching between verbal fluency tasks: an fMRI study with clinical implications. *Brain* 125: pp 1024 – 1038.
- Haapala EA, Poikkeus AM, Tompuri T, Kukkonen-Harjula K, Leppänen PHT, Lindi V et al. (2014). Associations of motor and cardiovascular performance with academic skills in children. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 46: pp 1016 – 1024.
- Handler SM, Fierston WM. (2011). Section on Ophthalmology; Council on Children with Disabilities; American Academy of Ophthalmology; American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus; American Association of Certified Orthoptists. Learning disabilities, dyslexia, and vision. *Pediatrics* 127(3): pp 818 - 856.
- Haxby JV, Grady CL, Horwitz B, Ungerleider LG, Mishkin M, Carson RE, Herscovitch P, Schapiro MB, Rapoport SI. (1991). Dissociation of object and spatial visual processing pathways in human extrastriate cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 88(5): pp 1621 - 1625.
- Heath GG (1956). The influence of visual acuity on accommodative response of the human eye. *American Journal of Optometry Archive American Academic Optometry* 33: pp 513-524.
- Heath GG. (1956). Components of accommodation. *American Journal of Optometry and Archives of the American Academy of Optometry* 33: pp 569 - 579.
- Heide W, Binkofski F, Seitz RJ, Posse S, Nitschke MF, Freund HJ, Kömpf D. (2001). Activation of frontoparietal cortices during memorized triple-step sequences of saccadic eye movements: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience* 13(6): pp 1177 - 1189.
- Heller D, Radach R (1999) Eye movements in reading. Are two eyes better than one? In: Current oculomotor research (Becker E, ed). New York: Plenum Press.
- Helmchen C, Rambold H, Erdmann C, Mohr C, Sprenger A, Binkofski F. (2003). The role of the fastigial nucleus in saccadic eye oscillations. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1004: pp 229 - 240.
- Helmholtz H von. (1924). Helmholtz's Treatise on Physiological Optics volume 1; translated from the third German edition by JPC Southall (New York: Optical Society of America).
- Helmholtz H von. (1925). Helmholtz's Treatise on Physiological Optics volume 2; translated from the third German edition by JPC Southall (New York: Optical Society of America).
- Helmholtz H von. (1925). Helmholtz's Treatise on Physiological Optics volume 3; translated from the third German edition by JPC Southall (New York: Optical Society of America).
- Helveston EM, Weber J, Miller K, Robertson K, Hohberger G, Estes R, Ellis F, Pick N, Helveston BH. (1985). Visual function and academic performance. *American Journal of Ophthalmology* 99(3): pp 346 – 355.
- Henderson JM, Choi W, Luke SG, Desai RH. (2015). Neural correlates of fixation duration in natural reading: Evidence from fixation-related fMRI. *Neuroimage* 119: pp 390 - 397.
- Hendry SH, Yoshioka T. (1994). A neurochemically distinct third channel in the macaque dorsal lateral geniculate nucleus. *Science* 264 (5158): pp 575 - 577.

- Hennessey D, Iosue RA, Rouse MW. (1984). Relation of symptoms to accommodative infacility of school-aged children. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 61: pp 177 – 183.
- Hepp K, Kenn V, Vilis T, Cohen V. (1989). In Wurtz RH et Goldberg RE (eds). The neurobiology of saccadic eye movements. Amsterdam, Elsevier, 1989.
- Hering E. (1977). The theory of binocular vision (translated by B. Bridgeman). New York: Herman JP, Blangero A, Madelain L, Khan A, Harwood MR. (2013). Saccade Adaptation as a Model of Flexible and General Motor Learning. *Experimental Eye Research* 114 : pp 6 – 15.
- Hikosaka O, Wurtz RH. (1983). Visual and oculomotor functions of monkey substantia nigra pars reticulata. II. Visual responses related to fixation of gaze. *Journal of Neurophysiology* 49(5): pp 1254 – 1267.
- Hikosaka O, Wurtz RH. (1983). Visual and oculomotor functions of monkey substantia nigra pars reticulata. III. Memory-contingent visual and saccade responses. *Journal of Neurophysiology* 49(5): pp 1268 – 1284.
- Hikosaka O, Wurtz RH. (1983). Visual and oculomotor functions of monkey substantia nigra pars reticulata. IV. Relation of substantia nigra to superior colliculus. *Journal of Neurophysiology* 49(5): pp 1285 – 1301.
- Hiraoka M, Shimamura M. (1989). The midbrain reticular-formation as an integration center for the near reflex in the cat. *Neuroscience Research* 7: pp 1 - 12.
- Hirota M, Kanda H, Endo T, Lohmann TK, Miyoshi T, Morimoto T, Fujikado T. (2016). Relationship between reading performance and saccadic disconjugacy in patients with convergence insufficiency type intermittent exotropia. *Japanese Journal of Ophthalmology* 60(4): pp 326 - 332.
- Hitch G, Towse J, Hutton U. (2001). What limits children's working memory span? Theoretical accounts and applications for scholastic development. *Journal of Experimental Psychology: General* 130(2): pp 184 – 198.
- Hock HS, Egeth H. (1970). Verbal interference with encoding in a perceptual classification task. *Journal of Experimental Psychology* 83(2): pp 299 - 303.
- Hoffman L, Cohen AH, Feuer G. (1973). Effectiveness of non- strabismus optometric vision training in a private practice. *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry* 50: pp 813 - 816.
- Hoffman LG. (1980). Incidence of vision difficulties in children with learning disabilities. *Journal of the American Optometric Association* 51: pp 447 - 451.
- Hofstetter HW. (1965). A longitudinal study of amplitude changes in presbyopia. *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry* 43: pp 3 – 8.
- Hokoda SC, Ciuffreda KJ. (1983). Theoretical and clinical importance of proximal vergence and accommodation. In Schor CM, Ciuffreda KJ (Eds), *Vergence Eye Basic and Clinical Aspects*. Boston, MA: Butterworth-Heinemann; 1983: pp 175–195.
- Hokoda SC. (1985) General binocular dysfunctions in an urban optometry clinic. *Journal of the American Optometric Association* 56: pp 560 - 562.
- Holmes G. (1992). Clinical symptoms of cerebellar disease and their interpretation (Croonian lectures III.). *Lancet ii*. pp 59 - 65.
- Horn AK, Helmchen C, Wahle P. (2003). GABAergic neurons in the rostral mesencephalon of the macaque monkey that control vertical eye movements. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1004: pp 19 - 28.
- Horn AK. (2006). The reticular formation. *Progress in Brain Research* 151: pp 127 - 155.
- Horwood AM, Riddell PM. (2013). Developmental changes in the balance of disparity, blur, and looming/proximity cues to drive ocular alignment and focus. *Perception* 42(7): pp 693 - 715.

- Horwood AM, Toor S, Riddell PM. (2014). Screening for convergence insufficiency using the CISS is not indicated in young adults. *British Journal of Ophthalmology* 98: pp 679 – 683.
- Hosoba M, Bando T, Tsukahara N. (1978). Cerebellar control of accommodation of eye in cat. *Brain Research* 153: pp 495 - 505.
- Howard HJ (1919) A test for the judgment of distance. *American Journal of Ophthalmology* 2: pp 656 – 675.
- Howard IP, Rodgers BJ. (1995). "Binocular vision and stereopsis". Oxford Psychology Series, #29. New York : Oxford University Press.
- Hubel D, Wiesel TN. (1962). "Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex". *Journal of Physiology* 160: pp 106 – 154.
- Hubel DH, Wiesel TN. (1970). The period of susceptibility: the physiological effects of unilateral eye closure in kittens. *J Physiol (Lond)*. 206:pp 419–430.
- Hung GK, Ciuffreda KJ (1983). Supplementary glossary of control system terminology. In Schor CM, Ciuffreda KJ (Eds), *Vergence eye movements: basic and clinical aspects*. Boston: Butterworth.
- Hung GK, Ciuffreda KJ, Rosenfield M. (1996). Proximal contribution to a linear static model of accommodation and vergence. *Ophthalmic and Physiological Optics* 16: pp 31 – 41.
- Ikeda Y, Okuzumi H, Kokubun M. (2013). Stroop/reverse-Stroop interference in typical development and its relation to symptoms of ADHD. *Research in Developmental Disabilities* 34: pp 2391 - 2398.
- Isa T, Hall WC. (2009). Exploring the superior colliculus in vitro. *Journal of neurophysiology* 102: pp 2581 - 2593.
- Ishai A, Ungerleider LG, Martin A, Haxby JV. (2000). The representation of objects in the human occipital and temporal cortex. *Journal of cognitive neurosciences* 12 suppl 2: pp 35 – 51.
- Jainta S, Hoormann J, Kloke WB, Jaschinski W. (2010). Binocularity during reading fixations: Properties of the minimum fixation disparity. *Vision Research* 50(18): pp 1775 - 1785.
- Jainta S, Kapoula Z. (2011). Dyslexic children are confronted with unstable binocular fixation while reading. *PLoSOne* 6:e18694.
- Janssen P, Vogels R, Liu Y, Orban GA. (2001). Macaque inferior temporal neurons are selective for three-dimensional boundaries and surfaces. *Journal of Neuroscience* 21: pp 9419 – 9429.
- Jaschinski W. (1997). Fixation disparity and accommodation as a function of viewing distance and prism load. *Ophthalmic and Physiological Optics* 17: pp 324–339.
- Jaswal R, Gohel S, Biswal BB, Alvarez TL. (2014). Task-modulated coactivation of vergence neural substrates. *Brain Connectivity* 4(8): pp 595 - 607.
- Jensen AR, Rohwer WD Jr. (1966). The Stroop color-word test: a review. *Acta Psychologica (Amsterdam)* 25: pp 36 – 93.
- Jha AP. (2002). Tracking the time-course of attentional involvement in spatial working memory: an event-related potential investigation. *Cognitive Brain Research* 15: pp 61 – 69.
- Jiang BJ. (1995). Accommodative vergence is driven by the phasic component of the accommodative controller. *Vision Research* 39: pp 97 – 102.
- Jones P. (1980). Fusional vergence: sustained and transient components. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 57: pp 640 – 644.
- Jones P. (1983). Horizontal disparity vergence in Schor CM, Ciuffreda KJ (Eds), *Vergence eye movements: basic and clinical aspects*, p 315. Boston: Butterworths.

- Jones R, Stephens GL. (1989). Horizontal fusional amplitudes. Evidence for disparity tuning. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 30(7): pp 1638 - 1642.
- Jonides J, Schumacher EH, Smith EE, Lauber EJ, Awh E, Minoshima S, Koeppe RA. (1997). Verbal working memory load affects regional brain activation as measured by PET. *Journal of Cognitive Neuroscience* 9: pp 462 – 475.
- Joubert C, Bedell HE. (1990). Proximal vergence and perceived distance. *Optometry and Vision Science* 67: pp 29 – 35.
- Judge SJ, Cumming BG. (1986). Neurons in the monkey midbrain with activity related to vergence eye-movement and accommodation. *Journal of Neurophysiology* 55: pp 915 - 930.
- Juhasz BJ, White SJ, Liversedge SP, Rayner K. (2008). Eye movements and the use of parafoveal word length information in reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 34: pp 1560 – 1579.
- Kaneko CR. (2006). Saccade-related, long-lead burst neurons in the monkey rostral pons. *Journal of Neurophysiology* 95: pp 979 - 994.
- Kapoula Z, Eggert T, Bucci MP. (1995). Immediate saccade amplitude disconjugacy induced by unequal images. *Vision Research* 35(23-24): pp 3505 - 3518.
- Kapoula Z, Evdokimidis I, Smyrnis N, Bucci MP, Constantinidis TS. (2002). EEG cortical potentials preceding vergence and combined saccade-vergence eye movements. *Neuroreport* 13: pp 1893 - 1897.
- Kapoula Z, Gaertner C, Matheron E. (2012). Spherical lenses and prisms lead to postural instability in both dyslexic and non dyslexic adolescents. Serino A, ed. *PLoS ONE*. 7(11): e46739.
- Kapoula Z, Isotalo E, Muri RM, Bucci MP, Rivaud-Pechoux S. (2001). Effects of transcranial magnetic stimulation of the posterior parietal cortex on saccades and vergence. *Neuroreport* 12: pp 4041 - 4046.
- Kapoula Z, Lê TT, Bonnet A, Bourtoire P, Demule E, Fauvel C, Quilicci C, Yang Q. (2010). Poor Stroop performances in 15-year-old dyslexic teenagers. *Experimental Brain Research* 203(2): pp 419 - 425.
- Kapoula Z, Morize A, Daniel F, Jonqua F, Orssaud C, Bremond-Gignac D. (2016). Objective evaluation of vergence disorders and a research based novel method for vergence rehabilitation. *Translational Vision Science and Technology* 5(2): p 8.
- Kapoula Z, Vitu F (2000) La lecture et la mobilité du regard. *La Tribune Internationale des Langues vivantes* 28:10-16.
- Kapoula Z, Vitu F. (2000). La lecture et la mobilité du regard. *La Tribune Internationale des Langues vivantes* 28: pp 10 - 16.
- Kapoula Z, Yang Q, Coubard O, Daunys G, Orssaud C. (2004). Transcranial magnetic stimulation of the posterior parietal cortex delays the latency of both isolated and combined vergence-saccade movements in humans. *Neuroscience Letters* 360: pp 95 - 99.
- Kapoula Z, Yang Q, Coubard O, Daunys G, Orssaud C. (2005). Role of the posterior parietal cortex in the initiation of saccades and vergence: right/left functional asymmetry. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1039: pp 184 - 197.
- Kapoula ZA, Robinson DA, Hain TC. (1986). Motion of the eye immediately after a saccade. *Experimental Brain Research* 61(2): pp 386 - 394.
- Kasthurirangan S, Vilupuru AS, Glasser A. (2003). Amplitude dependent accommodative dynamics in humans. *Vision Research* 43: pp 2945 – 2956.
- Kastner S, O'Connor DH, Fukui MM, Fehd HM, Herwig U, Pinsk MA. (2004). Functional imaging of the human lateral geniculate nucleus and pulvinar. *Journal of Neurophysiology* 91(1): pp 438 - 448.

- Kedzia B, Tondel G, Pieczyrak D, Maples WC. (1999). Accommodative facility test results and academic success in Polish second graders. *Journal of the American Optometric Association* 70: pp 110 - 116.
- Kent PR, Steeve JH. (1953). Convergence insufficiency, incidence among military personnel and relief by orthoptic methods. *Military Surgeon* 112(3): pp 202 - 205.
- Kieffer MJ, Vukovic RK, Berry D. (2013). Roles of Attention Shifting and Inhibitory Control in Fourth-Grade Reading Comprehension. *Reading Research Quarterly* 48(4): pp 333 – 348.
- Kiely PM, Crewther SG, Crewther DP. (2001). Is there an association between functional vision and learning to read? *Clinical and Experimental Optometry* 84(6): pp 346 - 353.
- King WM, Zhou W. (2002). Neural basis of disjunctive eye movements. *Annals of the New York Academy of Sciences* 956: pp 273 – 283.
- Kirkby JA, Blythe HI, Drieghe D, Liversedge SP. (2011). Reading text increases binocular disparity in dyslexic children. *PLoS One* 6:e27105.
- Kirkby JA, Webster LA, Blythe HI, Liversedge SP (2008) Binocular coordination during reading and non-reading tasks. *Psychological Bulletin* 134:742-763.
- Kliegl R, Nuthmann A, Engbert R. (2006). Tracking the mind during reading: The influence of past, present, and future words on fixation durations. *Journal of Experimental Psychology* 135: pp 12 – 35.
- Koretz JF, Kaufman PL, Neider MW, Goeckner PA. (1989). Accommodation and presbyopia in the human eye – aging of the anterior segment. *Vision Research* 29: pp 1685 – 1692.
- Kozicz T, Bittencourt JC, May PJ, Reiner A, Gamlin PD, Palkovits M, Horn AK, Toledo CA, Ryabinin AE. (2011). The edinger-westphal nucleus: A historical, structural, and functional perspective on a dichotomous terminology. *Journal of Comparative Neurology* 519: pp 1413 - 1434.
- Krug K, Parker AJ. (2011). Neurons in Dorsal Visual Area V5/MT Signal Relative Disparity. *Journal of Neuroscience* 31(49): pp 17892 – 17904.
- Kulp M, Mitchell GL, Borsting E, Scheiman M, Cotter S, Rouse M, Tamkins S, Mohny BG, Toole A, Reuter K. (2009). Effectiveness of placebo therapy for maintaining masking in a clinical trial of vergence/accommodative therapy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 50: pp 2560 – 2566.
- Kumar AN, Han Y, Garbutt S, Leigh RJ. (2002). Properties of anticipatory vergence responses. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 43(8): pp 2626 - 2632.
- Kumar AN, Han YH, Kirsch RF, Dell'Osso LF, King WM, Leigh RJ. (2006). Tests of models for saccade-vergence interaction using novel stimulus conditions. *Biological Cybernetics* 95(2) : pp 143 – 157.
- LaBerge D. (1997). Attention, Awareness, and the Triangular Circuit. *Consciousness and Cognition* 6(2/3): pp 149 - 181.
- Lamme VA, Roelfsema PR. (2000) The distinct modes of vision offered by feedforward and recurrent processing. *Trends in Neuroscience* 23: pp 571 – 579.
- Lang A, Gaertner C, Ghassemi E, Yang Q, Orssaud C, Kapoula Z. (2014). Saccade vergence properties remain more stable over short-time repetition under overlap than under gap task: a preliminary study. *Frontiers in Human Neuroscience* 8: p 372.
- Langer T, Kaneko CR, Scudder CA, Fuchs AF. (1986). Afferents to the abducens nucleus in the monkey and cat. *Journal of Comparative Neurology* 245: pp 379 - 400.
- Lansbergen MM, Kenemans JL, Van Engeland H. (2007). Stroop interference and attention-deficit/hyperactivity disorder: a review and meta-analysis. *Neuropsychology* 21 (2): pp 251 – 262.

- Lara F, Cacho P, García A, Megías R. (2001). General binocular disorders: prevalence in a clinic population. *Ophthalmic and Physiological Optics* 21(1): pp 70 - 74.
- Larrue V, Celsis P, Bes A, Marc-Vergnes JP. (1994). The functional anatomy of attention in humans: Cerebral blood flow changes induced by reading, naming, and the Stroop effect. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism* 14(6): pp 958 – 962.
- Lavrich JB. (2010). Convergence insufficiency and its current treatment. *Current Opinion in Ophthalmology* 21(5): pp 356 - 360.
- Lebedev MA, et al. (2004). Representation of attended versus remembered locations in prefrontal cortex. *PLoS Biology* 2, e365
- Lee K, Keller E, Heinen S. (2005). Properties of saccades generated as a choice response. *Experimental Brain Research* 162: pp 278 – 286.
- Lee SH, Cho HG, Park CM. (2013). A Study of Correlation Among Binocular Dysfunctions and Academic Achievement. *Journal of Korean Ophthalmic Optics Society* 18(4): pp 481 – 487.
- Lefavrais P. (1967). Test de l'Alouette. Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Lehto JE, Juujärvi P, Kooistra L, Pulkkinen L. (2003). Dimensions of executive functioning: evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology* 21: pp 59 – 80.
- Leigh RG, Zee DS. (2016). The neurology of eye movements. Fifth Edition. New York: Oxford University Press.
- Lemij HG, Collewijn H. (1991a). Long-term nonconjugate adaptation of human saccades to anisometric spectacles. *Vision Research* 31: pp 1939 - 1954.
- Lemij HG, Collewijn H. (1991b). Short-term nonconjugate adaptation of human saccades to anisometric spectacles. *Vision Research* 31: pp 1955 - 1966.
- Lemij HG, Collewijn H. (1992). Nonconjugate adaptation of human saccades to anisometric spectacles: meridian-specificity. *Vision Research* 32: pp 453 - 464.
- Letourneau J, Duci S. (1988). Prevalence of convergence insufficiency among elementary school children. *The Canadian Journal of Optometry* 50: pp 194 - 197.
- Letourneau JE, Lapierre N, Lamont A. (1979). The relationship between convergence insufficiency and school achievement. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 56: pp 18 - 22.
- Leung HC, and al. (2000). An event-related functional MRI study comparing interference effects in the Simon and Stroop tasks. *Cerebral Cortex* 10: pp 552–560.
- Lezak MD. (1982). The problem of assessing executive functions. *International Journal of Psychology* 17: pp 281 - 297.
- Lezak MD. (1995). Neuropsychological assessment (3rd ed.). New York: Oxford University Press.
- Liversedge SP, Rayner K, White SJ, Findlay JM, McSorley E. (2006). Binocular coordination of the eyes during reading. *Current Biology* 16(17): pp 1726 – 1729.
- Livingstone M, Hubell D. (1988). Segregation of form, color, movement, and depth: anatomy, physiology, and perception. *Science* 240 : 740 – 749.
- Lobel E, Kahane P, Leonards U, Grosbras M, Lehericy S, Le Bihan D, Berthoz A. (2001). Localization of human frontal eye fields: anatomical and functional findings of functional magnetic resonance imaging and intracerebral electrical stimulation. *Journal of Neurosurgery* 95(5): pp 804 - 815.
- Lobier M, Zoubrinetzky R, Valdois S. (2012). The visual attention span deficit in dyslexia is visual and not verbal. *Cortex* 48(6): pp 768 - 773.
- Logan GD. (1980). Attention and automaticity in Stroop and priming tasks: theory and data. *Cognitive Psychology* 12(4): pp 523 - 553.

- Logan GD. (1994). On the ability to inhibit thought and action: A user's guide to the stop signal paradigm. In D. Dagenbach & T. H. Carr (Eds.), *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (pp. 189–239). San Diego, CA: Academic Press.
- Logan GD. (1997). Automaticity and reading: perspectives from the instance theory of automatization. *Reading and Writing Quarterly* 13: pp 123 – 146.
- London R, Crelier RS (2006) Fixation disparity analysis: sensory and motor approaches. *Optometry* 77:590-608.
- Ludlam WM, Ludlam DE. (1988). Effects of prism-induced, accommodative convergence stress on reading comprehension test scores. *Journal of the American Optometric Association* 59(6): pp 440 – 445.
- Ludvig E. (1941). Extrafoveal visual acuity as measured with Snellen letters. *American Journal of Ophthalmology* 24: p 303.
- Lunt L, Bramham J, Morris RG, Bullock PR, Selway RP, et al. (2012). Prefrontal cortex dysfunction and “jumping to conclusions”: bias or deficit? *Journal of Neuropsychology* 6: pp 65 – 78.
- Luppino G, Rozzi S, Calzavara R, Matelli M. (2003). Prefrontal and agranular cingulate projections to the dorsal premotor areas F2 and F7 in the macaque monkey. *European Journal of Neuroscience* 17: pp 559 – 578.
- Luria AR. (1966). *Higher cortical functions in man*. New York: Basic Books.
- Luria AR. (1973). *The working brain*. London: Penguin.
- Lyon G, Shaywitz SE, Shaywitz BA. (2003). A definition of dyslexia. *Annals of Dyslexia* 53: pp 1 – 14.
- Ma TP, Graybiel AM, Wurtz RH. (1991). Location of saccade-related neurons in the macaque superior colliculus. *Experimental Brain Research* 85(1): pp 21 - 35.
- MacLeod CM, Dunbar K. (1988). Training and Stroop-like interference: evidence for a continuum of automaticity *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 14(1): pp 126 - 135.
- MacLeod CM. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review. *Psychological Bulletin* 109(2): pp 163 - 203.
- Maddox EE. (1893). *The clinical use of Prisms*, 2nd edition. Bristol, England : John Wright.
- Mahto RS. (1972). Eye strain from convergence insufficiency. *British Medical Journal* 2(5813): pp 564 - 565.
- Mansouri FA, Tanaka K, Buckley MJ. (2009). Conflict-induced behavioural adjustment: a clue to the executive functions of the prefrontal cortex. *Nature Reviews Neuroscience* 10(2): pp 141 - 152.
- Maples WC. (2002). Test-retest reliability of the college of optometrists in vision development quality of life outcomes assessment short form. *Journal of Optometric Vision Development* 33: pp 126 – 134.
- Maples WC. (2003). Visual factors that significantly impact academic performance. *Optometry* 74: pp 35 - 49.
- Martin PR, White AJ, Goodchild AK, Wilder HD, Sefton AE. (1997). Evidence that blue-on cells are part of the third geniculocortical pathway in primates. *European Journal of Neuroscience* 9(7): pp 1536 – 1541.
- Martinez-Conde S, Macknik SL, Troncoso XG, Hubel DH. (2009). Microsaccades: a neurophysiological analysis. *Trends in Neuroscience* 32(9): pp 463 – 475.
- Martinussen R, Major A. (2011). Working memory weaknesses in students with ADHD: implications for instruction. *Theory into Practice* 50: pp 68 – 75.
- May PJ, Hartwich-Young R, Nelson J, Sparks DL, Porter JD. (1990). Cerebellotectal pathways in the macaque: implications for collicular generation of saccades. *Neuroscience* 36(2): pp 305 - 324.

- May PJ, Porter JD, Gamlin PD. (1992). Interconnections between the primate cerebellum and midbrain near-response regions. *Journal of Comparative Neurology* 315: pp 98 - 116.
- Mayou S. (1946). The treatment of convergence deficiency. *British Journal of Ophthalmology* 30: pp 354 - 370.
- Mays LE, Gamlin PD. (1995). Neuronal circuitry controlling the near response. *Current Opinion in Neurobiology* 5(6): pp 763 - 768.
- Mays LE, Porter JD, Gamlin PDR, Tello CA. (1986). Neural control of vergence eye-movements—neurons encoding vergence velocity. *Journal of Neurophysiology* 56: pp 1007 - 1021.
- Mays LE, Porter JD. (1984). Neural control of vergence eye-movements— activity of abducens and oculomotor neurons. *Journal of Neurophysiology* 52: pp 743 - 761.
- Mays LE. (1984). Neural control of vergence eye movements: convergence and divergence neurons in midbrain. *Journal of Neurophysiology* 51: pp 1091 – 1108.
- Mazow M. (1971). The convergence insufficiency syndrome. *Journal of Pediatric Ophthalmology* 8: pp 243 - 244.
- McAdams CJ, Maunsell JH. (1999). Effects of attention on orientation-tuning functions of single neurons in macaque cortical area V4. *Journal of Neuroscience* 19: pp 431 – 441.
- McAlonan K et al. (2008). Guarding the gateway to cortex with attention in visual thalamus. *Nature* 456: pp 391 – 394.
- McConkie, G. W., Zola, D., Grimes, J., Kerr, P. W., Bryant, N. R., & Wolff, P. M. (1991). Children's eye movements during reading. In J. Stein (Ed.), *Vision and visual dyslexia* (pp. 251–262). London: Macmillan Press.
- McCormack GL, Fisher SK. (1996). The source of disparity vergence innervation determines prism adaptation. *Ophthalmic and Physiological Optics* 16: pp 73 – 82.
- McCormack GL. (1985). Vergence adaptation maintains heterophoria in normal binocular vision. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 62: pp 555 – 561.
- McDougal, D. H., & Gamlin, P. D. (2015). Autonomic control of the eye. *Comprehensive Physiology*, 5(1), pp 439–473.
- Mesulam MM. (1981). A cortical network for directed attention and unilateral neglect. *Annals of Neurology* 10(4): pp 309 - 325.
- Mesulam MM. (1990). Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. *Annals of Neurology* 28(5): pp 597 - 613. Review.
- Miles FA, Fuller JH, Braitman DJ, Dow BM. (1980). Long-term adaptive changes in primate vestibuloocular reflex. III. Electrophysiological observations in flocculus of normal monkeys. *Journal of neurophysiology* 43(5): pp 1437 - 1476.
- Milham MP, Banich MT, Claus ED, Cohen NJ. (2003). Practice-related effects demonstrate complementary roles of anterior cingulate and prefrontal cortices in attentional control. *Neuroimage* 18: pp 483 – 493.
- Milham MP, Banich MT, Webb A, Barad V, Cohen NJ, Wszalek T, Kramer AF. (2001). The relative involvement of anterior cingulate and prefrontal cortex in attentional control depends on nature of conflict. *Cognitive Brain Research* 12: pp 467 – 473.
- Milham MP, Erickson KI, Banich MT, Kramer AF, Webb A, Wszalek T, Cohen NJ. (2002). Attentional control in the aging brain: insights from an fMRI study of the stroop task. *Brain and Cognition* 49: pp 277 – 296.
- Miller EK, Cohen JD. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience* 24 (1): pp 167 – 202.
- Miller M, Hinshaw S. (2010). Does childhood executive function predict adolescent functional outcomes in girls with ADHD? *Journal of Abnormal Child Psychology* 38(3): pp 315 – 326.

- Millodot M, Millodot S. (1989). Presbyopia correction and the accommodation in reserve. *Ophthalmic and Physiological Optics* 9: pp 126 – 132.
- Miyake A, Friedman NP, Emerson MJ, Witzki AH, Howerter A, Wager TD. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: a latent variable analysis. *Cognitive Psychology* 41: pp 49 – 100.
- Moffitt TE, Arseneault L, Belsky D, Dickson N, Hancox RJ, et al. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108: pp 2693 – 2698.
- Mohanty A, Engels AS, Herrington JD, Heller W, Ho MH, Banich MT, Webb AG, Warren SL, Miller GA. (2007). Differential engagement of anterior cingulate cortex subdivisions for cognitive and emotional function. *Psychophysiology* 44: pp 343 – 351.
- Momeni-Moghaddam H, Kundart J, Azimi A, Hassanyani F. (2015). The effectiveness of home-based pencil push-up therapy versus office-based therapy for the treatment of symptomatic convergence insufficiency in young adults. *Middle East African Journal of Ophthalmology* 22: p 97.
- Monosov I et al. (2008). Measurements of simultaneously recorded spiking activity and local field potentials suggest that spatial selection emerges in the frontal eye field. *Neuron* 57: pp 614 – 625.
- Montés-Micó R. (2001). Prevalence of general dysfunctions in binocular vision. *Annals of Ophthalmology* 33(3): pp 205 - 208.
- Mordi JM, Ciuffreda KJ. (1998). Static aspects of accommodation: Age and presbyopia. *Vision Research* 38: pp 1643 – 1653.
- Mordi JM. (1991). Accommodation, aging and presbyopia. Doctoral dissertation, State College of Optometry, State University of New York, NY.
- Morecraft RJ, Geula C, Mesulam MM. (1993). Architecture of connectivity within a cingulo-fronto-parietal neurocognitive network for directed attention. *Archives of Neurology* 50: pp 279 – 284.
- Morgan MW. (1944). Analysis of clinical data. *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry* 21: pp 477 - 491.
- Morgan MW. (1960). Accommodative changes in presbyopia and their correction. In Hirsh MJ, Wick RE (Eds), *Vision of the Aging Patient*, pp 83 – 112. Philadelphia: Chilton.
- Morton J, Chambers SM. (1973). Selective attention to words and colours. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* Vol. 25 , Iss. 3,1973
- Moschovakis AK, Highstein SM. (1994). The anatomy and physiology of primate neurons that control rapid eye movements. *Annual Review of Neuroscience* 17: pp 465 - 488.
- Moschovakis AK, Scudder CA, Highstein SM, Warren JD. (1991b). Structure of the primate oculomotor burst generator. II. Medium-lead burst neurons with downward on-directions. *Journal of Neurophysiology* 65: pp 218 - 229.
- Mould WL. (1970). Recognition and management of atypical convergence insufficiency. *Journal of Pediatric Ophthalmology* 7: pp 212 - 214.
- Mountain MA, Snow-William WG. (1993). Wisconsin Card Sorting Test as a measure of frontal lobe pathology: A review. *The Clinical Neuropsychologist* 7: pp 108 – 118.
- Munoz DP, Wurtz RH. (1995). Saccade-related activity in monkey superior colliculus. I. Characteristics of burst and buildup cells. *Journal of Neurophysiology* 73: pp 2313 - 2333.
- Munoz P, Semmlow JL, Yuan W, Alvarez TL. (1999). Short term modification of disparity vergence eye movements. *Vision Research* 39: pp 1695 – 1705.
- Müri RM, Hess CW, Meienberg O. (1991). Transcranial stimulation of the human frontal eye field by magnetic pulses. *Experimental Brain Research* 86: pp 219 - 223.

- Müri RM, Iba-Zizen MT, Derosier C, Cabanis EA, Pierrot-Deseilligny C. (1996). Location of the human posterior eye field with functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 60(4): pp 445 - 448.
- Nachev P, Kennard C, Husain M. (2008). Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor areas. *Nature Reviews Neuroscience* 9: pp 856 – 869.
- Nadeau K. (1994). How to you know if you have ADD? In: Quinn PO, ed. ADD and the College Student: A Guide for High School and College Students with Attention Deficit Disorder. New York, NY: Magination Press; 1994: pp 7 – 18.
- Narayanasamy S, Vincent SJ, Sampson GP, Wood JM. (2015). Impact of simulated hyperopia on academic-related performance in children. *Optometry and Vision Science* 92(2): pp 227 - 236.
- Newman SD, Carpenter PA, Varma S, Just MA. (2003). Frontal and parietal participation in problem solving in the Tower of London: fMRI and computational modelling of planning and high-level perception. *Neuropsychologia* 41: pp 1668 – 1682.
- Nguyenkim JD, DeAngelis GC. (2003). Disparity-based coding of three-dimensional surface orientation by macaque middle temporal neurons. *Journal of Neuroscience* 23: pp 7117 – 7128.
- Nobre AC, Gitelman DR, Dias EC, Mesulam MM. (2000). Covert visual spatial orienting and saccades: overlapping neural systems. *Neuroimage* 11: pp 210 – 216.
- Noda H, Fujikado T. (1987). Topography of the oculomotor area of the cerebellar vermis in macaques as determined by microstimulation. *Journal of Neurophysiology* 58(2): pp 359 - 378.
- Noda H, Sugita S, Ikeda Y. (1990). Afferent and efferent connections of the oculomotor region of the fastigial nucleus in the macaque monkey. *Journal of Comparative Neurology* 302(2): pp 330 - 348.
- Norman DA, Shallice T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz, & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory* (pp. 1–18). New York: Plenum.
- Norn M. (1966). Convergence insufficiency: incidence in ophthalmic practice results of orthoptic treatment. *ACTA Ophthalmologia* 44: pp 132 - 138.
- North RV, Henson DB. (1981). Adaptation to prism-induced heterophoria in subjects with abnormal binocular vision or asthenopia. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 58: pp 746 – 752.
- Nuthmann A, Kliegl R (2009) An examination of binocular reading fixations based on sentence corpus data. *Journal of Vision* 9:1-28.
- Nuthmann A, Kliegl R. (2009). An examination of binocular reading fixations based on sentence corpus data. *Journal of Vision* 9(5): pp 1 – 28.
- O'Connor D et al. (2002). Attention modulates responses in the human lateral geniculate nucleus. *Nature Neuroscience* 5: pp 1203 – 1209.
- Ogle KN, Martens TG, Dyer JA. (1967). Oculomotor imbalance in binocular vision and fixation disparity, p 160. Philadelphia : Lea & Febiger.
- Ogle KN, Mussey F, Prangen AD. (1949). Fixation disparity and the fusional processes in binocular single vision. *American Journal of Ophthalmology* 32: pp 1069–1087.
- Ogle KN, Schwartz JT. (1959). Depth of focus of the human eye. *Journal of the Optical Society of America* 49(3): pp 273 – 280.
- Ogle KN. (1952). On the limits of stereoscopic vision. *Journal of experimental psychology* 44(4): p 253.
- Ogle KN. (1962). Part II : The optical space sense. In Davson H [Ed], *The eye*, Vol. 4, p.285. New York : Academic Press.

- Ogle KN. (1968). *Optics: An Introduction for Ophthalmologists*. Springfield, Illinois, Charles C Thomas, ed 2.
- Ohtsuka K, Maeda S, Oguri N. (2002). Accommodation and convergence palsy caused by lesions in the bilateral rostral superior colliculus. *American Journal of Ophthalmology* 133(3): pp 425 - 427.
- Ohtsuka K, Noda H. (1991). Saccadic burst neurons in the oculomotor region of the fastigial nucleus of macaque monkeys. *Journal of Neurophysiology* 65(6): pp 1422 - 1434.
- Ohtsuka K, Sawa M, Takeda M. (1989). Accuracy of memory-guided saccades. *Ophthalmologica* 198: pp 53 - 56.
- Olshausen BA, Anderson CH, Van Essen DC. (1993). A neurobiological model of visual attention and invariant pattern recognition based on dynamic routing of information. *Journal of Neuroscience* 13(11): pp 4700 - 4719.
- Optican LM, Zee DS, Chu FC. (1985). Adaptive response to ocular muscle weakness in human pursuit and saccadic eye movements. *Journal of Neurophysiology* 54: pp 110 – 122.
- Optican LM. (2005). Sensorimotor transformation for visually guided saccades. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1039: pp 132 - 148.
- O'Regan K, Levy-Schoen A. (1978). Eye movements during reading. *L'Année Psychologique* 78: pp 459 - 492.
- Ostrin LA, Glasser A. (2005). Comparisons between pharmacologically and edinger-westphal-stimulated accommodation in rhesus monkeys. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 46: pp 609 - 617.
- Ostrin LA, Glasser A. (2007). Edinger-westphal and pharmacologically stimulated accommodative refractive changes and lens and ciliary process movements in rhesus monkeys. *Experimental Eye Research* 84: pp 302 - 313.
- Ostrin LA, Glasser A. (2010). Autonomic drugs and the accommodative system in rhesus monkeys. *Experimental Eye Research* 90: pp 104 - 112.
- Owen AM, Downes JD, Sahakian BJ, Polkey CE, Robbins TW. (1990). Planning and spatial working memory following frontal lobe lesions in man. *Neuropsychologia* 28: pp 1021 – 1034.
- Palomo-Alvarez C, Puell MC. (2010). Binocular functions in a school children with reading difficulties. *Graefe's Archives for Clinical and Experimental Ophthalmology* 248: pp 885 – 892.
- Paniccia SM, Ayala AR. (2015). Prevalence of Accommodative and Non-Strabismic Binocular Anomalies in a Puerto Rican Pediatric Population. Optometric Extension Program Foundation.
- Panouillères M, Gaveau V, Socasau C, Urquizar C, Péliisson D. (2013). Brain Processing of Visual Information during Fast Eye Movements Maintains Motor Performance. *PLoS ONE* 8(1).
- Pardo JV, Fox PT, Raichle ME. (1991). PET localization of a human system for sustained attention. *Nature* 349: pp 61 - 64.
- Pardo JV, Pardo PJ, Janer KW, Raichle ME. (1990). The anterior cingulate cortex mediates processing selection in the Stroop attentional conflict paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 87: pp 256 – 259.
- Park G, Burri C. (1943). The relation of various eye conditions and reading achievement. *Journal of Educational Psychology* 34: pp 290 - 299.
- Parker A. (2007). "Binocular depth perception and the cerebral cortex". *Nature* 8(5): pp 379 – 391.

- Passmore JW, Maclean F. (1957). Convergence insufficiency and its management: an evaluation of 100 patients receiving a course of orthoptics. *American Journal of Ophthalmology* 43: pp 448 – 456.
- Patorgis CJ. (1987). Presbyopia. In Amos JF (Ed), *Diagnosis and Management in Vision Care*, pp 203 – 238. Boston: Butterworth.
- Paus T, Koski L, Caramanos Z, Westbury C. (1998). Regional differences in the effects of task difficulty and motor output on blood flow response in the human anterior cingulate cortex: a review of 107 PET activation studies. *Neuroreport* 9: R37 – R47.
- Paus T. (2001). Primate anterior cingulate cortex: where motor control, drive and cognition interface. *Nature Reviews Neuroscience* 2: pp 417 - 424.
- Pavlidis GT. (1981). Do eye movements hold the key to dyslexia? *Neuropsychologia* 19: pp 57 – 64.
- Péllisson D, Alahyane N, Panouillères M, Tilikete C. (2010). Sensorimotor adaptation of saccadic eye movements. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 34: pp 1103 – 1120.
- Pellizzer S, Siderov J. (1998). Assessment of vergence facility in a sample of older adults with presbyopia. *Optometry and Vision Science* 75: pp 817 – 821.
- Pennington BF, Ozonoff S. (1996). Executive functions and developmental psychopathology. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 37(1): pp 51 - 87. Review.
- Perret E. (1974). The left frontal lobe of man and the suppression of habitual responses in verbal categorical behavior. *Neuropsychologia* 12: pp 323 – 330.
- Petersen SE, Posner MI. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience* 35: pp 73-89.
- Peterson BS, Skudlarski P, Gatenby JC, Zhang H, Anderson AW, Gore JC. (1999). An fMRI study of Stroop word-color interference: Evidence for cingulate subregions subserving multiple distributed attentional systems. *Biological Psychiatry* 45: pp 1237 – 1258.
- Peyrin C, Démonet JF, N’Guyen-Morel MA, LeBas JF, Valdois S. (2010). Superior parietal lobule dysfunction in a homogeneous group of dyslexic children with a visual attention span disorder. *Brain and Language* 118: pp 128 – 138.
- Picard N, Strick PL. (1996). Motor areas of the medial wall: a review of their location and functional activation. *Cerebral Cortex* 6: pp 342 – 353.
- Pickwell L, Viggars M, Jenkins T. (1986). Convergence insufficiency in a rural population. *Ophthalmic and Physiological Optics* 6: pp 339 - 341.
- Pierrot-Deseilligny C, Müri RM, Ploner CJ, et al. (2003). Cortical control of ocular saccades in humans: a model for motricity. *Progress in Brain Research* 142: pp 3 – 17.
- Pierrot-Deseilligny C, Ploner CJ, Muri RM, Gaymard B, Rivaud-Pechoux S. (2002). Effects of cortical lesions on saccadic eye movements in humans. *Annals of the New York Academy of Sciences* 956: pp 216 - 229.
- Pierrot-Deseilligny C, Rivaud S, Gaymard B, Agid Y. (1991b) Cortical control of memory-guided saccades in man. *Experimental Brain Research* 83: pp 607 - 617.
- Pierrot-Deseilligny C, Rivaud S, Gaymard B, Muri R, Vermersch AI. (1995). Cortical control of saccades. *Annals of Neurology* 37: pp 557 - 567.
- Pierrot-Deseilligny C. (1989). Cortical control of saccades. *Revue Neurologique* 145: pp 596 - 604.
- Pierrot-Deseilligny C, Milea D, Müri RM. (2004). Eye movement control by the cerebral cortex. *Current Opinion in Neurology* 17(1): pp 17 - 25.
- Poggio GB, Motter BC, Squatrito S, Trotter Y. (1985). Responses of neurons in visual cortex (V1 and V2) of the alert macaque to dynamic random-dot stereograms. *Vision Research* 25 (3): pp 397 – 406.

- Poltavski DV, Biberdorf D, Petros TV. (2012). Accommodative response and cortical activity during sustained attention. *Vision Research* 63: pp 1 - 8.
- Porcar E, Martinez-Palomera A. (1997). Prevalence of general binocular dysfunctions in a population of university students. *Optometry and Vision Science* 74(2): pp 111 - 113.
- Posner M, Petersen SE. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience* 13: pp 25 - 42.
- Posner MI, Cohen Y, Rafal RD. (1982). Neural system control of spatial orientation. *Philosophical transactions of the royal society of London* 298: pp 187 - 198.
- Posner MI, DiGirolamo GJ. (1998) in *The Attentive Brain* (ed. Parasuraman, R.) pp 401 – 423 (MIT Press, 1998).
- Posner MI, Raichle ME. (1994). *Images of Mind*. W.H. Freeman (Ed.), New-York: Scientific American Library.
- Posner MI, Rothbart MK. (1991). Attentional mechanisms and conscious experience. In A.D. Milner et M.D Rugg (Eds), *The neuropsychology of consciousness*. Londres: Academic Press, pp 91 - 112.
- Posner MI, Snyder CR, Davidson BJ. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology* 109: pp 160 - 174.
- Posner MI, Snyder CRR. (1975). Attention and cognitive control. In Robert L. Solso (ed.), *Information Processing and Cognition: The Loyola Symposium*. Lawrence Erlbaum.
- Posner MI, Walker JA, Friedrich FA, Rafal RD. (1987). How do the parietal lobes direct covert attention? *Neuropsychologia* 25(1a): pp 135 - 145.
- Posner MI, Walker JA, Friedrich FJ, Rafal RD. (1984). Effects of parietal injury on covert orienting attention. *The Journal of Neuroscience* 4: pp 1863 - 1874.
- Posner MI. (1994). Attention in the Cognitive Neurosciences: An Overview. In M. Gazzaniga (Ed.), *The Cognitive Neurosciences*, p. 615-624.
- Posner MI. (1994). Attention: The mechanisms of consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 91: pp 7398 - 7403.
- Post RB, Johnson CA, Tsuetaki TK. (1984). Comparison of laser and infrared techniques for measurement of the resting focus of accommodation: mean differences and long-term variability. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 4(4): pp 327-32.
- Postle BR, Awh E, Jonides J, Smith EE, D'Esposito M. (2004). The where and how of attention-based rehearsal in spatial working memory. *Cognitive Brain Research* 20: pp 194 – 205.
- Powers M, Grisham D, Riles P. (2008). Saccadic tracking skills of poor readers in high school. *Optometry* 79(5): pp 228 - 234.
- Prince SJ, Pointon AD, Cumming BG, Parker AJ. (2000). The precision of single neuron responses in cortical area V1 during stereoscopic depth judgments. *Journal of Neuroscience* 20(9): pp 3387 - 3400.
- Protopapas A, Archonti A, Skaloumbakas C. (2007). Reading ability is negatively related to Stroop interference. *Cognitive Psychology* 54: pp 251 – 282.
- Puce A, Allison T, Asgari M, Gore JC, McCarthy G. (1996). Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures: a functional magnetic resonance imaging study. *Journal of neuroscience* 16: pp 5205 – 5215.
- Purves D, Augustine GJ, Fitzpatrick D, Hall W, Lamantia S, White L, and all. (2015). *Neurosciences*. 5th edition. De Boeck Université, neurosciences et cognition.
- Qian N. (1997). Binocular Disparity and the Perception of Depth. *Neuron* 18(3): pp 359 - 368.
- Quaid P, Simpson T. (2013). Association between reading speed, cycloplegic refractive error, and oculomotor function in reading disabled children versus controls. *Graefe's Archives for Clinical and Experimental Ophthalmology* 251(1): pp 169 - 187.

- Ramat S, Das VE, Somers JT, Leigh RJ. (1999a). Tests of two hypotheses to account for different-sized saccades during disjunctive gaze shifts. *Experimental Brain Research* 129: pp 500-510.
- Ramat S, Leigh RJ, Zee DS, Optican LM. (2005). Ocular oscillations generated by coupling of brainstem excitatory and inhibitory saccadic burst neurons. *Experimental Brain Research* 160: pp 89 - 106.
- Ramsdale C, Charman WN. (1988). Accommodation and convergence: Effects of lenses and prisms in 'closed-loop' conditions. *Ophthalmic and Physiological Optics* 8: pp 43–52.
- Rao SC, Rainer G, Miller EK. (1997). Integration of what and where in the primate prefrontal cortex. *Science* 276: pp 821 – 824.
- Rawley JB, Constantinidis C. (2009). Neural correlates of learning and working memory in the primate posterior parietal cortex. *Neurobiology of learning and memory* 91(2): pp 129 - 138.
- Rayner K, Duffy SA. (1986). Lexical complexity and fixation times in reading: Effects of word frequency, verb complexity, and lexical ambiguity. *Memory & Cognition* 14: pp 191 –201.
- Rayner K, Liversedge SP, White SJ. (2006). Eye movements when reading disappearing text: The importance of the word to the right of fixation. *Vision Research* 46: pp 310 - 323.
- Rayner K, McConkie GW. (1976). What guides a reader's eye movements? *Vision Research* 16: pp 829 – 837.
- Rayner K, Pollatsek A, Ashby J, Clifton C. (2011). *Psychology of Reading*. (2nd Edn). Psychology Press, 496.
- Rayner K, Slattery TJ, Bélanger NN. (2010). Eye movements, the perceptual span, and reading speed. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(6), 834–839.
- Rayner K. (1978). Eye movements in reading and information processing. *Psychological Bulletin* 85: pp 618 - 660.
- Rayner K. (1985). Do faulty eye movements cause dyslexia? *Developmental Neuropsychology* 1: pp 3 – 15.
- Rayner K. (1986). Eye movements and the perceptual span in beginning and skilled readers. *Journal of Experimental Child Psychology* 41: pp 211 – 236.
- Rayner K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin* 124: pp 372 – 422.
- Rayner K. (2009). The 35th Sir Frederick Bartlett Lecture: eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 62: pp 1457 – 1506.
- Reason J. (1984). Lapses of attention in everyday life. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Eds.), *Varieties of attention* (pp. 515–549). London: Academic Press Inc.
- Redick TS, Engle RW. (2006). Working memory capacity and attention network test performance. *Applied Cognitive Psychology* 20: pp 713 – 721.
- Richman JE, Garzia RP. (1990). *Developmental Eye Movement test (DEM) test manual*. South Bend, IN: Bernell Corporation, 1990.
- Richter HO, Costello P, Sponheim SR, Lee JT, Pardo JV. (2004). Functional neuroanatomy of the human near/far response to blur cues: eye-lens accommodation/vergence to point targets varying in depth. *The European Journal of neuroscience* 20(10): pp 2722 - 2732.
- Ridderinkhof KR, Ullsperger M, Crone EA, Nieuwenhuis S, (2004a). The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science* 306 (5695): pp 443 – 447.
- Ripps H, Breinin GM, Baum JL. (1961). Accommodation in the cat. *Transactions of the American Ophthalmological Society* 59: pp 176 - 193.

- Rivaud S, Muri RM, Gaymard B, Vermersch AI, Pierrot-Deseilligny C. (1994). Eye movement disorders after frontal eye field lesions in humans. *Experimental Brain Research* 102: pp 110 - 120.
- Rizzolatti G, Riggio L, Dascola I, Umiltá C. (1987). Reorienting attention across the horizontal and vertical meridians: evidence in favor of a premotor theory of attention. *Neuropsychologia* 25: pp 31 – 40.
- Robinson DA, Kapoula Z, Goldstein HP. (1990). In: From neuron to action - An appraisal of fundamental and clinical research (Deecke L, Eccles JC, Mountcastle VB, eds), pp 89 - 96. New York: Springer.
- Robinson DA. (1964). The mechanics of human saccadic eye movement. *The Journal of Physiology* 174(2): pp 245 – 264.
- Robinson DA. (1966). The mechanics of human vergence eye movements. *Journal of Pediatric Ophthalmology* 3: pp 31 - 37.
- Robinson DA. (1975). Oculomotor control signals. In: Basic mechanisms of ocular motility and their clinical implications (Lennerstrand G, Bach-y-Rita P, eds), pp 337 - 374. Oxford: Pergamon.
- Robinson DL. (1993). Functional contributions of the primate pulvinar. *Progress in Brain Research* 95: pp 371 - 380.
- Roelofs A, van Turenout M, Coles MG. (2006). Anterior cingulate cortex activity can be independent of response conflict in Stroop-like tasks. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103(37): pp 13884 - 13889.
- Rogers RD, Andrews TC, Grasby PM, Brooks DJ, Robbins TW. (2000). Contrasting cortical and subcortical activations produced by attentional- set shifting and reversal learning in humans. *Journal of Cognitive Neuroscience* 12: pp 142 – 162.
- Rogers RD, Monsell S. (1995). Costs of predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology* 124: pp 207 – 231.
- Rosano C, Krisky CM, Welling JS, Eddy WF, Luna B, Thulborn KR, Sweeney JA. (2002). Pursuit and saccadic eye movement subregions in human frontal eye field: a high-resolution fMRI investigation. *Cerebral Cortex* 12(2): pp 107 - 115.
- Rosenfield M, Gilmartin B. (1988). The effect of vergence adaptation on convergent accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics* 1988;8(2): pp 172-7. Erratum in: *Ophthalmic Physiol Opt* 1988;8(3):359.
- Rosner J. (1997). The relationship between moderate hyperopia and academic achievement: how much plus is enough? *Journal of the American Optometric Association* 68(10): pp 648 - 650.
- Rouse M, Borsting E, Hyman L, Hussein M, Cotter S, Flynn M, et al. (1999). Frequency of convergence insufficiency among fifth and sixth graders. The Convergence Insufficiency and Reading Study (CIRS) group. *Optometry and Vision Science* 76: pp 643 - 649.
- Rouse M, Borsting E, Mitchell GL, Cotter SA, Kulp M, Scheiman M, Barnhardt C, Bade A, Yamada T. (2009). Validity of the convergence insufficiency symptom survey: a confirmatory study. *Optometry and Vision Science* 86: pp 357 – 363.
- Rouse M, Hyman L, Hussein M, Solan H. (1998). Frequency of convergence insufficiency in optometry clinic settings. Convergence Insufficiency and Reading Study (CIRS) Group. *Optometry and Vision Science* 75: pp 88 - 96.
- Rouse MW, Borsting EJ, Mitchell GL, et al. (2004). Validity and reliability of the revised convergence insufficiency symptom survey in adults. *Ophthalmic and Physiological Optics* 24(5): pp 384 - 390.

- Rousseaux M, Cabaret M, Bernati T, Saj A, Kozlowski O. (2006). Interactions entre attention et fonctions exécutives. In P. Pradat-Diehl, P. Azouvi & V. Brun (Eds.), *Fonctions Exécutives et Rééducation*. Paris: Masson.
- Saalman YB, Kastner S. (2009). Gain control in the visual thalamus during perception and cognition. *Current Opinion in Neurobiology* 19: pp 408 – 414.
- Sakai K, Rowe JB, Passingham RE. (2002). Active maintenance in prefrontal area 46 creates distractor-resistant memory. *Nature Neuroscience* 5(5): pp 479 - 484.
- Salman MS, Sharpe JA, Eizenman M, Lillakas L, Westall C, To T, Dennis M, Steinbach MJ. (2006). Saccades in children. *Vision Research* 46: pp 1432 – 1439.
- Samuels SJ. (1999). Developing reading fluency in learning-disabled students. In: Sternberg RJ, Spear-Swerling L (eds) *Perspectives on learning disabilities: Biological, Cognitive, Contextual*. Westview, Boulder
- Saupe K, Schröger E, Andersen SK, Müller MM. (2009). Neural mechanisms of intermodal sustained selective attention with concurrently presented auditory and visual stimuli. *Frontiers in Human Neuroscience* 2009 Nov 30: pp 3 -58.
- Schaeffel F, Wilhelm H, Zrenner E. (1993). Inter-individual variability in the dynamics of natural accommodation in humans: relation to age and refractive errors. *The Journal of Physiology* 461: pp 301 - 320.
- Schall JD, Morel A, Kaas JH. (1993). Topography of supplementary eye field afferents to frontal eye field in macaque: implications for mapping between saccade coordinate systems. *Visual Neuroscience* 10: pp 385 - 393.
- Scheiman M, Cooper J, Mitchell GL, et al. (2002). A survey of treatment modalities for convergence insufficiency. *Optometry and Vision Science* 79: pp 151 – 157.
- Scheiman M, Cotter S, Kulp MT, et al. (2011). Treatment of Accommodative Dysfunction in Children: Results from a Random Clinical Trial. *Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry* 88(11): pp 1343 - 1352.
- Scheiman M, Gallaway M, Coulter R, Reinstein F, Ciner E, Herzberg C, Parisi M. (1996). Prevalence of vision and ocular disease conditions in a clinical pediatric population *Journal of the American Optometric Association* 67: pp 193 - 202.
- Scheiman M, Mitchell GL, Cotter S, et al. (2005). A randomized clinical trial of vision therapy/orthoptics versus pencil pushups for the treatment of convergence insufficiency in young adults. *Optometry and Vision Science* 82: pp 583 – 595.
- Scheiman M, Rouse M, Kulp MT, Cotter S, Hertle R, Mitchell, G.L. (2009). Treatment of convergence insufficiency in childhood: a current perspective. *Optometry Vision Science*. 86, 420-428.
- Scheiman M, Wick B. (2014). *Clinical Management of Binocular Vision: Heterophoric, Accommodative and Eye Movement Disorders* (4th edition). Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins.
- Scheiman MM, Rouse MW. (1994). *Optometric management of learning related vision problems*. St. Louis: Mosby, 1994.
- Schiller PH, Stryker M. (1972). Single-unit recording and stimulation in superior colliculus of the alert rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology* 35: pp 915 - 924.
- Schlag-Rey M, Schlag J. (1989). The central thalamus. *Reviews of Oculomotor Research* 3: pp 361 - 390.
- Schneider W, Shiffrin RM. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review* 84: pp 1 – 66.
- Schor C, Homer D. (1989). Adaptive disorders of accommodation and vergence in binocular dysfunction. *Ophthalmic and Physiological Optics* 9: pp 264 – 268.

- Schor CM, Alexander J, Cormack L, Stevenson S. (1992). Negative feedback control model of proximal convergence and accommodation. *Ophthalmic and physiological optics* 12: pp 307 – 318.
- Schor CM, Ciuffreda KJ. (1983). Vergence Eye Movements: basic and clinical aspects. Boston: Butterworths.
- Schor CM, Kotulak JC. (1986). Dynamic interactions between accommodation and convergence are velocity sensitive. *Vision Research* 26: pp 927 – 942.
- Schor CM. (1983). Analysis of tonic and accommodative vergence disorders of binocular vision. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 60: pp 1 – 14.
- Schor CM. (1983). Fixation disparity and vergence adaptation. In: Schor CM, Ciuffreda KJ, eds. Vergence eye movements: basic and clinical aspects. Boston: Butterworths, 1983: pp 465 - 516.
- Schor CM. (2009). Neuromuscular plasticity and rehabilitation of the ocular near response. *Optometry and Vision Science* 86: pp 1788 – 1802.
- Schumacher EH, Lauber E, Awh E, Jonides J, Smith EE, Koeppel RA. (1996). PET evidence for an amodal verbal working memory system. *Neuroimage* 3: pp 79 – 88.
- Scudder CA, Kaneko CS, Fuchs AF. (2002). The brainstem burst generator for saccadic eye movements: a modern synthesis. *Experimental Brain Research* 142(4): pp 439 - 462.
- Seassau M, Bucci MP. (2013). Reading and Visual Search: A Developmental Study in Normal Children. *PLoS ONE* 8(7): e70261.
- Segraves MA. (1992). Activity of monkey frontal eye field neurons projecting to oculomotor regions of the pons. *Journal of Neurophysiology* 68: pp 1967 - 1985.
- Seidman LJ, Biederman J, Faraone SV, Weber W, Ouellette C. (1997). Toward defining a neuropsychology of attention-deficit/hyperactivity disorder: Performance of children and adolescents from a large clinically referred sample. *Journal of Consulting and Clinical Psychology* 65: pp 150 – 160.
- Seidman LJ, Biederman J, Monuteaux M, Weber W, Faraone SV. (2000). Neuropsychological functioning in nonreferred siblings of children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Abnormal Psychology* 109: pp 252 – 265.
- Semmlow JL, Abdel-Wahed S, Hung GK, Ciuffreda KJ. (1984). Adaptive response dynamics in disparity vergence. *IEEE Frontiers of Engineering and Computing in Health Care* 1984. pp 492 – 494.
- Semmlow JL, Hung G. (1979). Accommodative and fusional components of fixation disparity. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 18: pp 1082–1086.
- Semmlow JL, Hung GK, Horng JL, Ciuffreda KJ. (1994). Disparity vergence eye movements exhibit preprogrammed motor control. *Vision Research* 34: pp 1335 – 1343.
- Serna A, Rogers DL, McGregor ML, Golden RP, Bremer DL, Rogers GL. (2011). Treatment of symptomatic convergence insufficiency with a home-based computer orthoptic exercise program. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus* 15: pp 140 – 143.
- Seron X, Van der Linden M, Andres P. (1999). Le lobe frontal : A la recherche de ses spécificités fonctionnelles. In M. Van der Linden, X. Seron, D. Le Gall, P. Andrés, (Eds.), *Neuropsychologie des lobes frontaux* (pp. 33-88). Marseille: Solal.
- Sève R. (2009). *Science de la couleur : Aspects physiques et perceptifs*, Marseille, Chalagam.
- Shallice T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 298: pp 199 – 209.
- Shallice T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Sheard C. (1930). Zones of ocular comfort. *American Journal of Optometry* 7: pp 9 - 25.

- Sheedy JE, Saladin JJ. (1978). Association of symptoms with measures of oculomotor deficiencies. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 55(10): pp 670 - 676.
- Shimo Y, Hikosaka O. (2001). Role of tonically active neurons in primate caudate in reward-oriented saccadic eye movement. *Journal of Neuroscience* 21(19): pp 7804 - 7814.
- Shin HS, Park SC, Maples WC. (2011). Effectiveness of vision therapy for convergence dysfunctions and long-term stability after vision therapy. *Ophthalmic and Physiological Optics* 31(2): pp 180 - 189.
- Shin HS, Park SC, Park CM. (2009). Relationship between accommodative and vergence dysfunctions and academic achievement for primary school children. *Ophthalmic and Physiological Optics* 29: pp 615 - 624.
- Shiozaki HM, Tanabe S, Doi T, Fujita I. (2012). Neural activity in cortical area V4 underlies fine disparity discrimination. *Journal of Neuroscience* 32(11): pp 3830 – 3841.
- Shipp S. (2003) The functional logic of cortico-pulvinar connections. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 358: pp 1605 – 1624.
- Shirachi D, Liu, Lee M, et al. (1978). Accommodation dynamics: Range non-linearity. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*. 55: pp 631-641.
- Simons HD, Gassler PA. (1988). Vision anomalies and reading skill: a meta-analysis of the literature. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 65(11): pp 893 - 904.
- Sindermann F, Geiselman B, Fischler M. (1978). Single motor unit activity in extraocular muscles in man during fixation and saccades. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 45: pp 64 - 73.
- Smith EE, Jonides J, Koeppe RA. (1996). Dissociating verbal and spatial working memory using PET. *Cerebral Cortex* 6: pp 11 – 20.
- Sobol NA, Hoffmann K, Vogel A, Lolk A, Gottrup H, Høgh P, Hasselbalch SG, Beyer N. (2015). Associations between physical function, dual-task performance and cognition in patients with mild Alzheimer's disease. *Aging & Mental Health* 10: pp 1 - 8.
- Soetedjo R, Kaneko CR, Fuchs AF. (2002). Evidence that the superior colliculus participates in the feedback control of saccadic eye movements. *Journal of Neurophysiology* 87(2): pp 679 - 695.
- Sommer MA, Wurtz RH. (2004). What the brain stem tells the frontal cortex. II. Role of the SC-MD-FEF pathway in corollary discharge. *Journal of Neurophysiology* 91: pp 1403 – 1423.
- Sparks DL, Nelson JS. (1987). Sensory and motor maps in the mammalian superior colliculus. *Trends in Neuroscience* 10: pp 312 - 317.
- Sparks DL, Porter JD. (1983). Spatial localization of saccade targets. II. Activity of superior colliculus neurons preceding compensatory saccades. *Journal of Neurophysiology* 49: pp 64 - 74.
- Sprenger-Charolles L, Colé P, Kipffer-Piquard A, et al. (2009). Reliability and prevalence of an atypical development of phonological skills in French-speaking dyslexics. *Reading and Writing* 22(7): pp 811 - 842.
- Sreenivasan V, Bobier WR. (2014). Reduced vergence adaptation is associated with a prolonged output of convergence accommodation in convergence insufficiency. *Vision Research* 100: pp 99 – 104.
- Sreenivasan V, Bobier WR. (2015). Increased onset of vergence adaptation reduces excessive accommodation during the orthoptic treatment of convergence insufficiency. *Vision Research* 111 : pp 105 – 113.

- St Clair-Thompson HL, Gathercole SE. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 59: pp 745 – 759.
- Stanton GB, Goldberg ME, Bruce CJ. (1988). Frontal eye field efferents in the macaque monkey: I. Subcortical pathways and topography of striatal and thalamic terminal fields. *Journal of Comparative Neurology* 271: pp 473 - 492.
- Stark EK. (1932). Studies in ocular fatigue. III. Fatigue of accommodation: history, apparatus, and methods of graphic study. *American Journal of Ophthalmology* 15: pp 216 – 223.
- Sterner B, Gellerstedt M, Sjoström A. (2006). Accommodation and the relationship to subjective symptoms with near work for young schoolchildren. *Ophthalmic and Physiological Optics* 26: pp 148 – 155.
- Stewart-Brown S, Haslum MN, Butler N. (1985). Educational attainment of 10-year-old children with treated and untreated visual defects. *Developmental Medicine & Child Neurology* 27(4): pp 504 - 513.
- Stoet G, Snyder LH. (2007) Extensive practice does not eliminate human switch costs. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience* 7: pp 192 – 197.
- Strassman A, Highstein SM, McCrea RA. (1986a). Anatomy and physiology of saccadic burst neurons in the alert squirrel monkey. I. Excitatory burst neurons. *Journal of Comparative Neurology* 249: pp 337 - 357.
- Strassman A, Highstein SM, McCrea RA. (1986b). Anatomy and physiology of saccadic burst neurons in the alert squirrel monkey. II. Inhibitory burst neurons. *Journal of Comparative Neurology* 249: pp 358 - 380.
- Stroop JR. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology* 18: pp 643 - 662.
- Stuss DT, Benson DF. (1986). The frontal lobes. New York: Raven Press.
- Stuss DT, Floden D, Alexander MP, Levine B, Katz D. (2001). Stroop performance in focal lesion patients: dissociation of processes and frontal lobe lesion location. *Neuropsychologia* 39: pp 771 – 786.
- Stuss DT, Shallice T, Alexander MP, Picton TW. (1995). A multidisciplinary approach to anterior attentional functions. *Annals of the New York Academy of Sciences* 769: pp 191 – 209.
- Sylvestre PA, Cullen KE. (2002). Dynamics of abducens nucleus neuron discharges during disjunctive saccades. *Journal of neurophysiology* 88(6) : pp 3452 -3468.
- Takagi M, Frohman EM, Zee DS. (1995). Gap-overlap effects on latencies of saccades, vergence and combined vergence-saccades in humans. *Vision Research* 35: pp 3373 - 3388.
- Takagi M, Oyamada H, Abe H, Zee DS, Hasebe H, Miki A, Usui T, Hasegawa S, Bando T. (2001). Adaptive changes in dynamic properties of human disparity-induced vergence. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 42(7): pp 1479 - 1486. Erratum in: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 42(10): p 2163.
- Takagi M, Tamargo R, Zee DS. (2003). Effects of lesions of the cerebellar oculomotor vermis on eye movements in primate: binocular control. *Progress in Brain Research* 142: pp 19 - 33.
- Takagi M, Zee DS, Tamargo R. (1998). Effects of lesions of the oculomotor vermis on eye movements in primate: saccades. *Journal of Neurophysiology* 80: pp 1911 – 1930.
- Takemura A, Inoue Y, Kawano K, Quaia C, Miles FA. (2001). Single-unit activity in cortical area Mst associated with disparity-vergence eye movements: Evidence for population coding. *Journal of Neurophysiology* 85: pp 2245 - 2266.
- Tanaka M. (2006). Inactivation of the central thalamus delays self-timed saccades. *Nature Neuroscience* 9(1): pp 20 - 22.

- Taylor SF, Kornblum S, Lauber EJ, Minoshima S, Koeppe RA. (1997). Isolation of specific interference processing in the Stroop task: PET activation studies. *Neuroimage* 6(2): pp 81 – 92.
- Teitelbaum B, Pang Y, Krall J. (2009). Effectiveness of base in prism for presbyopes with convergence insufficiency. *Optometry and Vision Science* 86(2): pp 153 - 156.
- Thiagarajan P, Ciuffreda KJ, Ludlam DP. (2011). Vergence dysfunction in mildtraumatic brain injury (mTBI) : a review. *Ophthalmic and Physiological Optics* 31: pp 456 – 468.
- Thiagarajan P, Ciuffreda KJ. (2013). Effect of oculomotor rehabilitation on vergence responsivity in mild traumatic brain injury. *Journal of Rehabilitation Research & Development* 50: pp 1223 – 1240.
- Thompson KG, Bichot NP. (2005). A visual salience map in the primate frontal eye field. *Progress in Brain Research* 147: pp 251 – 262.
- Tipper SP, Weaver B, Cameron S, Brehaut JC, Bastedo J. (1991). Inhibitory mechanisms of attention in identification and localization tasks: time course and disruption. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 17(4): pp 681 - 692.
- Tornqvist G. (1966). Effect of cervical sympathetic stimulation on accommodation in monkeys. An example of a beta-adrenergic, inhibitory effect. *Acta Physiologica Scandinavica* 67: pp 363 - 372.
- Tornqvist G. (1967). The relative importance of the parasympathetic and sympathetic nervous systems for accommodation in monkeys. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 6: pp 612 - 617.
- Trauzettel-Klosinski S, Koitzsch AM, Dürnwächter U, Sokolov AN, Reinhard J, Klosinski G. (2010). Eye movements in German-speaking children with and without dyslexia when reading aloud. *Acta Ophthalmologica* 88: pp 681 – 691.
- Treisman A, Fearnley S. (1969). The Stroop test: selective attention to colours and words. *Nature* 222(5192): pp 437 - 439.
- Troost BT, Weber RB, Daroff RB. (1974). Hypometric saccades. *American Journal of Ophthalmology* 78(6): pp 1002 - 1005.
- Trotter Y, Celebrini S, Durand JB. (2004). Evidence for implication of primate area V1 in neural 3-D spatial localization processing. *Journal of Physiology, Paris*. 98(1-3): pp 125 - 134.
- Tucker J, Charman WN (1986). Depth of focus and accommodation for sinusoidal gratings as a function of luminance. *American Journal of Optometry and Physiological Optic* 63(1): pp 58-70.
- Turner MJ. (1958). Observations on the normal subjective amplitude of accommodation. *British Journal of Physiological Optics* 15: pp 70-100.
- Tyler CW, Elsaid AM, Likova LT, Gill N, Nicholas SC. (2012). Analysis of human vergence dynamics. *Journal of Vision* 12(11): p 21.
- Tzelepi A, Yang Q, Kapoula Z. (2005). The effect of transcranial magnetic stimulation on the latencies of vertical saccades. *Experimental Brain Research* 164: pp 67 - 77.
- Ungerleider LG et al. (2008). Cortical connections of area V4 in the macaque. *Cerebral Cortex* 18: pp 477 – 499.
- Ungerleider LG, Mishkin M. (1982). Two Cortical Visual Systems. In: Ingle DJ, et al., editors. *Analysis of Visual Behavior*. The MIT Press; 1982. pp. 549–586.
- Vaegan JL. (1979). Convergence and divergence show large and sustained improvement after short isometric exercise. *American Journal of Optometry and Physiological Optics* 56: pp 23 – 33.

- Valdois S, Bosse ML, Ans B, Carbonnel S, Zorman M et al. (2003). Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: Evidence from two case studies. *Reading and Writing* 16: pp 541 - 572.
- Van der Schoot M, Licht R, Horsley TM, Sergeant JA. (2000). Inhibitory deficits in reading disability depend on subtype: Guessers but not spellers. *Child Neuropsychology* 6(4): pp 297 – 312.
- Van der Sluis S, de Jong PF, van der Leij A. (2007). Executive functioning in children, and its relations with reasoning, reading, and arithmetic. *Intelligence* 35: pp 427 – 449.
- Van Gisbergen JA, Robinson DA, Gielen S. (1981). A quantitative analysis of generation of saccadic eye movements by burst neurons. *Journal of Neurophysiology* 45(3): p 417 - 442.
- Van Leeuwen AF, Westen MJ, van der Steen J, De Faber JT, Collewijn H. (1999). Gaze-shift dynamics in subjects with and without symptoms of convergence insufficiency: influence of monocular preference and the effect of training. *Vision Research* 39: pp 3095 –3107.
- Van Opstal AJ, Van Gisbergen JA. (1987). Skewness of saccadic velocity profiles: a unifying parameter for normal and slow saccades. *Vision Research* 27(5): pp 731 – 745.
- Van Zomeren AH, Brouwer WH. (1994). *Clinical Neuropsychology of Attention*. New York: Oxford University Press.
- Van Zomeren AH. (1995). Attentional disorders after severe closed head injury (CHI). In C. Bergego & P. Azouvi (Eds.), *Neuropsychologie des Traumatismes Crâniens Graves de l'Adulte* (pp. 133-146). Paris: Frison-Roche.
- Vaughn W, Maples WC, Hoenes R. (2006). The association between vision quality of life and academics as measured by the College of Optometrists in Vision Development Quality of Life questionnaire. *Optometry* 77(3): pp 116 - 123.
- Verhoef BE, Vogels R, Janssen P. (2012). Inferotemporal cortex subserves three-dimensional structure categorization. *Neuron* 73(1): pp 171 - 182.
- Vernet M, Kapoula Z. (2009). Binocular motor coordination during saccades and fixations while reading: a magnitude and time analysis. *Journal of Vision* 9(7):2, pp 1 - 13.
- Vernet M, Yang Q, Daunys G, Orssaud C, Eggert T, Kapoula Z. (2008). How the brain obeys Hering's law: a TMS study of the posterior parietal cortex. *Investigative Ophthalmology and Vision Science* 49(1): pp 230 - 237.
- Vernet M. (2009). *Coordination des mouvements oculaires dans l'espace 3D chez l'homme : substrat cortical étudié par TMS*. Thèse de doctorat en neurosciences cognitives. Sous la direction de Z. Kapoula.
- Versino M, Hurko O, Zee DS. (1996). Disorders of binocular control of eye movements in patients with cerebellar dysfunction. *Brain* 119: pp 1933 - 1950.
- Vilupuru AS, Kasthurirangan S, Glasser A. (2005). Dynamics of accommodative fatigue in rhesus monkeys and humans. *Vision Research* 45: pp 181 – 191.
- Vitu F, McConkie GW. (2000). Regressive saccades and word perception in adult reading. In: Kennedy A, Radach R, Heller D, Pynte J, editors. *Reading as a perceptual process*. Elsevier; Oxford, England: pp. 301–326.
- Vogt BA, Finch DM, Olson CR. (1992). Functional heterogeneity in cingulate cortex: The anterior executive and posterior evaluative regions. [Review]. *Cerebral Cortex* 2(6): pp 435 – 443.
- Von Helmholtz HH. (1909). Helmholtz's treatise on physiological optics. In: Southall JPC, ed. *Mechanism of accommodation*; vols 1, 2. New York: Dover Publications, pp 143 – 172.

- Von Noorden GK, Dowling JE, Fergusson DC. (1971). Experimental amblyopia in monkeys. I. Behavioral studies of stimulus deprivation amblyopia. *Archives of Ophthalmology*. 84: pp 206 – 218.
- Von Noorden GK. (1985). Binocular vision and ocular motility. *Theory and management of strabismus*, 3rd edition, p25, 34, 71, 77, 138, 349. St. Louis: CV Mosby.
- Von Noorden GK. (2002). Binocular Vision and Ocular Motility. Theory and Management of Strabismus. St. Louis MO: Mosby; 2002.
- Votan P, Lachkar Y. (2017). 3^{ème} édition. Guide pratique d'ophtalmologie Editions Vernazobres Grego
- Wager TD, Jonides J, Reading S. (2004). Neuroimaging studies of shifting attention: a meta-analysis. *Neuroimage* 22: pp 1679 – 1693.
- Wager TD, Smith EE. (2003). Neuroimaging and working memory: a meta-analysis. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* 3(4): pp 255 – 274.
- Walton MM, Mays LE. (2003). Discharge of saccade-related superior colliculus neurons during saccades accompanied by vergence. *Journal of Neurophysiology* 90: pp 1124 - 1139.
- Wang L, Liu X, Guise KG, Knight RT, Ghajar J, Fan J. (2010). Effective connectivity of the fronto-parietal network during attentional control. *Journal of Cognitive Neuroscience* 22: pp 543 – 553.
- Wassle H, Grunert U, Martin PR, Boycott BB. (1994). Immunocytochemical characterization and spatial distribution of midget bipolar cells in the macaque monkey retina. *Vision Research* 34(5): pp 561 – 579.
- Westheimer G, Blair SM. (1973). Oculomotor defects in cerebellectomized monkeys. *Investigative Ophthalmology* 12(8): pp 618 - 621.
- Westheimer G, Mitchell DE. (1969). The sensory stimulus for disjunctive eye movements. *Vision Research* 9(7): pp 749 - 755.
- Whalen PJ, Bush G, McNally RJ, Wilhelm S, McInerney SC, Jenike MA, Rauch SL. (1998). The emotional counting stroop paradigm: A functional magnetic resonance imaging probe of the anterior cingulate affective division. *Biological Psychiatry* 44: pp 1219 – 1228.
- White JW, Brown HW. (1939). Occurrence of vertical anomalies associated with convergent and divergent anomalies. *Archives of Ophthalmology* 21(6): pp 999 - 1009.
- Wilkinson DT, Halligan PW, Marshall JC, Büchel C, Dolan RJ. (2001). Switching between the forest and the trees: Brain systems involved in local/global changed-level judgements. *Neuroimage* 13: pp 56 – 67.
- Wilmer JB, Buchanan GM. (2009). Nearpoint phorias after nearwork predict ADHD symptoms in college students. *Optometry and Vision Science* 86(8): pp 971 - 978.
- Wilson FA, Scialoja SP, Goldman-Rakic PS. (1993). Dissociation of object and spatial processing domains in primate prefrontal cortex. *Science* 260(5116): pp 1955 - 1958.
- Wilson ME, Bluestein EC, Parks MM. (1993). Binocularity in accommodative esotropia. *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus* 30: pp 233 – 236.
- Wold RM (1967). The spectacle amplitude of accommodation of children ages 6 to 10. *American Journal of Optometry Archive American Academic Optometry*. 44: pp 642-664.
- Wright CE, Marino VF, Chubb C, Rose KA. (2011). Exploring attention-based explanations for some violations of Hick's law for aimed movements. *Attention, Perception & Psychophysics* 73(3): pp 854-871.
- Yang Q, Bucci MP, Kapoula Z. (2002). The latency of saccades, vergence, and combined eye movements in children and in adults. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 43: pp 2939 – 2949.

- Yang Q, Kapoula Z. (2003). Binocular coordination of saccades at far and at near in children and in adults. *Journal of Vision* 3(8): pp 554–561.
- Yarbus AL. (1957). Motion of the eye on interchanging fixation points at rest in space. *Biofizika* 2: pp 698-702.
- Yarbus AL. (1967). *Eye Movements and Vision*. New York: Plenum.
- Zee DS, Fitzgibbon EJ, Optican LM. (1992). Saccade-vergence interactions in humans. *Journal of neurophysiology* 68(5): pp 1624 – 1641.
- Zhang H, Gamlin PDR. (1996). Single-unit activity within the posterior fastigial nucleus during vergence and accommodation in the alert primate [abstract] *Society for neuroscience* 22 p 2034.
- Zhang H, Gamlin PDR. (1998). Neurons in the posterior interposed nucleus of the cerebellum related to vergence and accommodation. I. Steady-state characteristics. *Journal of Neurophysiology* 79: pp 1255 - 1269.
- Zhang Y, Mays LE, Gamlin PDR. (1992). Characteristics of near response cells projecting to the oculomotor nucleus. *Journal of Neurophysiology* 67: pp 944 - 960.
- Zuber BL, Stark L. (1966). Saccadic suppression: elevation of visual threshold associated with saccadic eye movements. *Experimental Neurology* 16: pp 65 - 79.

ANNEXE

Etude 1

Binocular Vision and the Stroop Test

François Daniel and Zoï Kapoula

REVIEW

Binocular Vision and the Stroop Test

François Daniel* and Zoï Kapoula†

ABSTRACT

Purpose. Recent studies report a link between optometric results, learning disabilities, and problems in reading. This study examines the correlations between optometric tests of binocular vision, namely, of vergence and accommodation, reading speed, and cognitive executive functions as measured by the Stroop test.

Methods. Fifty-one students (mean age, 20.43 ± 1.25 years) were given a complete eye examination. They then performed the reading test *L'Alouette* and the Stroop interference test at their usual reading distance. Criteria for selection were the absence of significant refractive uncorrected error, strabismus, amblyopia, color vision defects, and other neurologic findings.

Results. The results show a correlation between positive fusional vergences (PFVs) at near distance and the interference effect (IE) in the Stroop test: the higher the PFV value is, the less the IE. Furthermore, the subgroup of 11 students presenting convergence insufficiency, according to Scheiman and Wick criteria (2002), showed a significantly higher IE during the Stroop test than the other students ($N = 18$) who had normal binocular vision without symptoms at near. Importantly, there is no correlation between reading speed and PFV either for the entire sample or for the subgroups.

Conclusions. These results suggest for the first time a link between convergence capacity and the interference score in the Stroop test. Such a link is attributable to the fact that vergence control and cognitive functions mobilize the same cortical areas, for example, parietofrontal areas. The results are in favor of our hypothesis that vergence is a vector of attentional and cognitive functions.

(Optom Vis Sci 2016;93:194–208)

Key Words: optometric tests, vergence dysfunctions, Stroop test, reading, inhibition

Binocular Function and Academic Achievements

When binocular or accommodative disorders occur, specific symptoms such as double vision, blurred vision, headache, asthenopia, or loss of concentration are reported.^{1,2} These ocular symptoms can have a negative impact on close work performance such as reading or academic achievement^{2–4} and usually lead to frustration and avoidance in children.^{5,6} Maples⁷ and Vaughn et al.,⁸ using similar methods of screening, have shown that the number of symptoms are negatively correlated with academic achievement in children. Maples⁷ also argues that some visual factors were found to be much better predictors of scores on basic academic performance than either race or socioeconomic status. Grisham et al.⁹ studied a sample of poor readers in high school and found that 80% of them presented specific dysfunctions, more related to binocularity and vergence than to accommodative deficiencies. The impact of an accommodative dysfunction appeared

to be a less obvious factor^{10–12} than vergence dysfunction on reading.^{9,13–15}

Vergence dysfunctions are more common than we might think in the general population.^{16,17} This is particularly true of convergence insufficiency (CI),¹⁸ with about 7% of median prevalence in both children and adults.^{19–21} Convergence insufficiency is a binocular vision disorder, initially defined by Duane²² (with the following criteria: exophoria greater at near than at distance, near point of convergence >6 cm, decreased positive fusional vergence [PFV] at near).

Vergence is highly important in reading: the eyes have to converge to maintain single vision, and the focusing system increases the optical power of the eyes to maintain clear vision. In parallel, the eyes perform saccades to fixate one word after the other. Saccades must be highly coordinated to keep the same angle of vergence required for single vision, and accommodation has to stay stable. Problems with accommodation, vergence, or bad synergy between the two can certainly have an impact on reading performance. Indeed, some studies have shown that poor coordination in saccadic eye movement during reading is usually found in people with vergence dysfunction.^{23,24} Moreover, Alvarez and Kim²⁵ and Alvarez et al.²⁶ showed that people

*MS(Neurosci)

†DR

IRIS Group, Physiopathologie de la Vision et Motricité Binoculaire, CNRS FR3636 Université Paris Descartes, Paris, France (both authors).

diagnosed as having CI also had coordination problems during vergence movements, that is, a longer latency and nonsymmetrical peak velocity for the two eyes during symmetrical convergence compared with binocularly normal control subjects.

Vergence Problems, Attention Problems, and Cognitive Executive Functions

Convergence insufficiency has also been associated with attention problems.^{20,27} Borsting et al.²⁸ showed that schoolchildren diagnosed as having CI or accommodative dysfunctions frequently exhibited attention deficit issues and attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) symptoms.

The capacity to focus attention is imperative to perform specific cognitive executive functions. These cognitive processes refer to the higher-level cognitive skills, including reasoning, working memory, and task flexibility. Recent studies have linked comprehension in reading with cognitive executive functions like inhibition. Protopapas et al.²⁹ used the Stroop test^{30,31} (whereby the subject must inhibit a reading response in favor of a less obvious response [color denomination]) on poor readers without dyslexia and showed that they took longer to perform this task than normal readers. Difficulty to inhibit a task in favor of another is also found by Cain³² in children with problems of memory and reading comprehension. In fact, reading and Stroop interference tests share common processes relative to executive functions, such as inhibition and attention. Moreover, inhibitory processes are also linked with attention disorders and symptoms related to ADHD.³³

Goal of the Study

Given that eye movements are strongly linked to attention,³⁴ we hypothesize that accommodation or vergence dysfunctions could have a relationship with both reading and cognitive executive functions. Our major interest is to seek possible correlations between reading speed, Stroop test results, and optometric measurements. Comparing these results in isolating control subjects and subjects showing specific vergence and/or accommodation dysfunctions might shed light on the presence of significant correlations between optometric results and reading measurements or Stroop test results. To test this, this study uses both the Stroop test and the *L'Alouette* reading test. The major questions asked are as follows:

- In young healthy adult subjects, what are the correlations among selected binocular vision skills and reading speed, as tested with the “Alouette” test or with the reading task of the Stroop test?
- In young healthy adult subjects, what are the correlations among selected binocular vision skills and cognitive executive functions, as tested with the Stroop test?
- Is there a mean group difference among young healthy asymptomatic adult subjects, presenting normal accommodative and binocular functions, and those with symptoms and presenting accommodative or vergence dysfunctions in terms of reading speed or Stroop test results?

We predict that vergence problems, potentially interfering with single binocular vision, might be more harmful than accommodative problems concerning reading and cognitive executive function as tested with the Stroop test.

METHODS

Subjects

A total of 51 voluntary students aged 18 to 24 years (mean, 20.43 ± 1.25 years; 17 men and 34 women) who were studying optics at the *Lycée d'Optique Fresnel* in Paris participated in this study. All subjects presented normal binocular vision: a minimum of 20/25 visual acuity for each eye, no signs of amblyopia or strabismus, and no neurological findings. In addition, they were excluded from the study if the following criteria were observed: vertical phoria greater than 1 prism diopter (Δ , PD); an antecedent of eye pathology or surgery that could affect visual acuity or motility; signs of color vision defects (checked with an Ishihara plate test), which would affect their ability to normally perform the Stroop test. In fact, they also had to be oblivious to the workings of both the “Alouette” reading test and the Stroop test.

The investigation adhered to the tenets of the Declaration of Helsinki and was approved by the local human experimentation committee, the *Comité de Protection des Personnes Ile de France VI* (No: 07035), Necker Hospital, in Paris. Written informed consent was obtained from all subjects after the nature of the procedure was explained.

Procedure and Testing

Every student had to fill in a questionnaire about their case history, including ocular and systemic conditions. To determine if there were visual symptoms at near, we also used the Convergence Insufficiency Symptom Survey (CISS), which allows us to determine specific symptoms experienced by people with vergence or accommodative dysfunctions at near. A score equal to or higher than 16 is deemed to be significant to consider the presence of CI in a subject.³⁵

The subjects' refraction was then objectively tested with an Auto-refractor ARK-1 Nidek and subjectively with a Phoropter Nidek RT-600 to determine the best correction (monocular fogging method to a standard endpoint of maximum plus) to obtain optimal visual acuity. All subsequent measures were done with the optimum correction using the Phoropter or a Trial Frame (Oculus Adult UB4, Zeiss) in free space:

Visual Acuity

Measured in monocular and binocular vision at 5 m (using a distance Snellen chart projector, endpoint 20/15; Essilor) and at near distance (using the Optoprox, Snellen near chart, endpoint 20/16; Essilor).

Binocular Vision

Evaluated with the Wirt Rings Stereo Test to determine the stereopsis (results in seconds of arc; Stereo Optical Company) and with the Mallett Fixation Disparity Test to determine and measure central suppression and horizontal and/or vertical fixation disparity (Mallett Dual Fixation Disparity Test Unit and Mallett Near Vision Unit NV5). The horizontal and/or vertical associated phoria was measured in PDs with a prism bar, representing the minimum amount of prism to reduce the fixation disparity to zero.

Vergence

The near point of convergence (NPC) was measured in free space with a fixation stick (Bernell Corp.) and a millimeter ruler, distance measured from the outer canthus, results are in centimeters. The convergence and divergence fusional ranges at distance and near vision were measured with the Phoropter using rotary prisms (base-out [BO] for convergence and base-in [BI] for divergence). We recorded the usual extreme points in PD: “blur” as soon as the subject reported blurry vision, “break” as soon as they reported double vision, and “recovery” as soon as they reported single vision again. Fusion ranges are more representative when compared with phoria than isolated. We used the measurement of the phoria as the basis to calculate the exact effort in convergence and divergence.³⁶ The total fusional vergence (TFV) range represents the highest effort the subject can make to keep clear and single vision from phoria to the blur point or to the break point when there was no blur. We decided to use the PFV and negative fusional vergence (NFV), measured from the phoria position, to obtain more practical measurements according to Sheard’s criterion.³⁷ The TFV represents the total range of single and clear vision, including the total convergence and divergence fusional ranges. The vergence facility, testing the ability of the fusional vergence system to respond rapidly and accurately to changing vergence demands across time (defined as the number of cycles per minute that a stimulus can be fused through alternating BI and BO prisms), using 8BI/16BO flipper lenses at near distance in free space, was measured. A previous study used and validated a 3BI/12BO flipper lenses as a reference to diagnose flexibility problems.³⁸ We wanted to test stronger variation on vergence demand and to compare the levels of vergence facility measured in other studies using the same amount of prisms.^{39,40}

Accommodation

Binocular fused cross cylinders were used to evaluate the response of accommodation at 40 cm (Jackson Cross as a target). Negative and positive relative accommodations were measured using the Phoropter, increasing (NRA) or decreasing (PRA) the spherical lens power binocularly in 0.25-D increments until the subject reported the first sustained blur. Monocular and binocular accommodative ranges (near point of accommodation [NPA]) were measured in free space with the Donder’s push-up method and a millimeter rule. All measurements were repeated three times, and the average was used for the analysis in converting the distance in millimeters to diopters. We measured the binocular and monocular accommodative facilities, testing the ability of the accommodative system to respond rapidly and accurately to changing accommodative demands across time (defined as the number of cycles per minute that a stimulus can be seen clearly through alternating plus and minus lenses), using ± 2 D flipper lenses in free space. We recorded the numbers of entire cycles performed in 1 min. We took the average between right and left monocular facility as a result for this task.

Phorias and AC/A Ratio

Distance and near horizontal and vertical dissociated phorias were measured with the phoropter using Von Graefe’s method, and vertical phoria was checked again with a Maddox rod. On the basis of the phorias, we calculated the AC/A ratio, that is, the far-

near AC/A, with the following formula: $(15 - \text{distance phoria} + \text{near phoria})/2.5$.^{37,41} Near horizontal phoria was then taken, again adding +1D and -1D, to measure the gradient AC/A ratio. We calculated the gradient AC/A ratio with the following formula: $(\text{near phoria with } -1\text{D} - \text{near phoria with } +1\text{D})/2$.

Classification

In accordance with Scheiman and Wick,⁴² we compared the results of each test with the norms they established. Vergence and accommodative dysfunctions were classified by taking into account the number of signs used in the studies of Porcar and Martinez-Palomera¹⁸ and Shin et al.³ This classification of the sample and the most important optometric measures mean values and standard deviations are shown in Table 1 (standard deviations are in parentheses): group 1 (N = 21), subjects presenting no vergence or accommodative dysfunctions; group 2 (N = 8), subjects presenting CI without accommodative dysfunctions; group 3 (N = 2), subjects presenting CI and accommodative insufficiency; group 4 (N = 3), subjects presenting convergence excess without accommodative dysfunction; group 5 (N = 2), subjects presenting basic esophoria without accommodative dysfunction; group 6 (N = 11), subjects presenting accommodative excess (AE) without vergence dysfunction; and group 7 (N = 2), subjects presenting accommodative infacility without vergence dysfunction. One subject presented both basic esophoria and accommodative insufficiency, and one other subject presented both CI and AE.

Experimental Tests

The “Alouette” Reading Test

Subjects read aloud a 265-word text in French,^{43,44} largely devoid of meaning, as quickly as possible and without making mistakes. This task was performed to have an initial idea of their reading speed. This test was first developed for children to evaluate their basic reading skills and their automatic lexical decoding but not necessarily their comprehension or memory. Time, corrected errors (when subjects make mistakes but correct them immediately after), and uncorrected errors were measured for each subject. We calculated the reading speed by dividing the numbers of words/items by the time spent (words per minute).

The Stroop Test

The version that we used is made up of three different tasks: in the “reading” task, the subject has to read aloud a succession of words designating colors (red, green, blue, or yellow) written in black; in the “denomination” phase, the subject has to name a succession of dots of color (red, green, blue, or yellow); in the “interference” phase, the subject has to name the color of the print of the word, printed in an incongruent color (red, green, blue, or yellow), for example, the word “blue” printed in green. Each trial contains 100 items (10-line or 10-column matrix) randomly placed, and subjects were instructed to finish as quickly as possible without making mistakes or omissions. For this analysis, we used similar methods to those used by Kapoula et al.⁴⁵ Time, corrected errors (when the subject made a mistake but corrected it immediately after), and uncorrected errors were measured for each task and for each subject. We calculated the reading or color denomination speed by dividing

TABLE 1.

Mean values relative to vergence and accommodative functions per group

	Group 1 NBV + NAD	Group 2 CI	Group 3 CI + AIS	Group 4 CE
N	21	8	2	3
CISS score	12.52 (±6.83)	21.5 (±6.57)	26 (±12.73)	14.33 (±15.31)
NPC, cm	7.93 (±3.78)	10.5 (±2.98)	14.5 (±2.12)	10.33 (±5.13)
Distance phoria, PD	0.98 (±3.78)	-2.43 (±1.92)	-1 (±1.41)	5.66 (±4.48)
Distance NFV, PD	11.74 (±5.57)	7.56 (±2.38)	13 (±7.07)	11.67 (±5.84)
Distance PFV, PD	11.31 (±4.91)	10.69 (±4.17)	12 (±5.66)	12.33 (±8.13)
Near phoria, PD	-0.76 (±3.08)	-8.75 (±3.74)	-8 (±2.83)	9.33 (±7.37)
Near NFV, PD	15.76 (±5.09)	6.86 (±3.19)	6.5 (±7.78)	19 (±3)
Near PFV, PD	23.33 (±6.62)	22.5 (±7.08)	17.5 (±0.71)	23.33 (±2.89)
Cal. AC/A, PD/D	5.32 (±1.34)	3.5 (±0.89)	3.2 (±0.57)	7.47 (±1.2)
Gradient AC/A, PD/D	3.42 (±1.63)	2.78 (±0.69)	1.38 (±0.88)	4.67 (±2.02)
Monocular NPA, D	10.63 (±2.83)	9.52 (±1.19)	4.66 (±0.86)	8.96 (±3.92)
Binocular NPA, D	12.58 (±2.71)	6.5 (±4.02)	5.99 (±1.39)	10 (±4.29)
Monocular accommodative facility, c./min	11.17 (±5.66)	7.66 (±4.73)	1.5 (±1.41)	10.17 (±1.26)
Binocular accommodative facility, c./min	9.40 (±4.63)	6.5 (±4.02)	0.5 (±0)	5.33 (±4.25)
Vergence facility, c./min	10.62 (±3.79)	8.31 (±3.81)	4.25 (±5.30)	5.5 (±4.44)
NRA, D	1.9 (±0.35)	1.69 (±0.46)	1.63 (±0.88)	2.25 (±0.43)
PRA, D	2.45 (±1.28)	5.5 (±1.41)	5.5 (±1.41)	1.08 (±0.76)

	Group 5 BES	Group 6 AE	Group 7 AIF	CI + AE	BES + AIS
N	2	11	2	1	1
CISS score	21 (±1.41)	19.27 (±11.57)	12 (±12.73)	35	20
NPC, cm	8.5 (±4.95)	6.55 (±2.58)	8 (±2.82)	12	12
Distance phoria, PD	9.5 (±2.12)	-0.36 (±2.00)	0.5 (±0.71)	2	2
Distance NFV, PD	20 (±4.24)	8.82 (±1.74)	15 (±5.66)	9	10
Distance PFV, PD	5.5 (±6.36)	12.09 (±7.72)	9.5 (±4.95)	4	6
Near phoria, PD	8.25 (±0.35)	-2.27 (±3.07)	-2.5 (±6.36)	-7	3.5
Near NFV, PD	19.75 (±0.35)	11.73 (±4.54)	11.5 (±0.71)	10	9.5
Near PFV, PD	15.75 (±8.83)	24.45 (±5.01)	24.5 (±6.36)	13	18.5
Cal. AC/A, PD/D	5.5 (±0.99)	5.24 (±0.85)	4.8 (±2.26)	2.4	6.6
Gradient AC/A, PD/D	5.25 (±0.35)	3.5 (±1.79)	2.75 (±0.35)	1.5	4.5
Monocular NPA, D	10.57 (±2.38)	10.29 (±1.27)	8.96 (±0.8)	8.69	7.77
Binocular NPA, D	13.33 (±4.71)	12.41 (±2.17)	11.52 (±2.15)	10	9.52
Monocular accommodative facility, c./min	9.5 (±12.73)	2.52 (±1.65)	2.25 (±1.06)	0.75	3.25
Binocular accommodative facility, c./min	12 (±11.31)	2.59 (±2.92)	2 (±0)	0.5	5
Vergence facility, c./min	13.75 (±7.42)	10.5 (±4.69)	6.25 (±1.06)	0.5	5.5
NRA, D	2 (±0)	1.61 (±0.26)	1.75 (±0)	0.75	2.25
PRA, D	1.25 (±0.35)	2.57 (±1.40)	2.63 (±2.65)	4	1.5

AE, accommodative excess; AIF, accommodative infacility; AIS, accommodative insufficiency; BES, basic esophoria; CE, convergence excess; CI, convergence insufficiency; CISS, Convergence Insufficiency Symptom Survey; NBV + NAD, no vergence or accommodative dysfunction; NFV, negative fusional vergence; NPA, near point of accommodation; NPC, near point of convergence; NRA, negative relative accommodation; PFV, positive fusional vergence; PRA, positive relative accommodation.

the numbers of words/items by the time spent (words or items per minute). The error rate (ER) was also calculated with this formula:

$$ER = \frac{\text{numbers of corrected errors} + (\text{numbers of uncorrected errors} \times 2)}{\text{total number of items}}$$

An uncorrected error had to represent a higher importance than a corrected one. Such weighting is usually applied to clinical use of the test (Victoria test adapted for French)⁴⁵ because uncorrected errors may represent a higher loss of attention. To evaluate the flexibility between tasks in Stroop, we also calculated the time differences. According to MacLeod³¹ and Jensen and Rohwer,⁴⁶

time differences are believed to be more appropriate to evaluate Stroop interference. As in the study of Stuss et al.,⁴⁷ we opted for the following formulas:

$$\text{Color Effect} = \text{Color naming} - \text{Reading};$$

$$\text{Interference Effect} = \text{Interference} - \text{Color naming}.$$

Statistical Analysis

Linear regressions were applied to search for correlations, with independent variables as the optometric results and experimental tests results as the dependent variables.

TABLE 2.
Mean values of the sample in the reading tasks and the Stroop test

	“Alouette” reading task	Stroop reading task	Stroop denomination task	Stroop interference task	Stroop color effect (CE)	Stroop interference effect (IE)
Time, s	107.8 (±53.51)	41.83 (±6.78)	60.83 (±10.91)	93.89 (±19.33)	19 (±8.16)	33.06 (±11.25)
Error rate	11.23 (±7.45)	0.15 (±0.41)	1.51 (±2.06)	3.91 (±3.36)	—	—

In addition, comparisons between subgroups (symptomatic vs. nonsymptomatic subjects, normal subjects vs. subjects presenting dysfunctions of vergence or accommodation) were carried out. We used the Shapiro-Wilk test to test for the normality of the data distribution. As normality failed, nonparametric Kruskal-Wallis analysis of variance (ANOVA) and nonparametric Mann-Whitney U tests were performed to compare the groups with each other. Comparisons were done for all parameters of the reading and Stroop tests.

RESULTS

General Reading and Stroop Test Results

The mean group values and standard deviations for the reading test and Stroop test are shown in Table 2 (standard deviations are in parentheses). As expected, the reading speeds (words per minute) during the Stroop reading task and during the task *L’Alouette* were correlated ($R^2 = 0.49, p < 0.001$).

Correlations between the CISS Score, Reading Speed, and Stroop IE Results

The linear regression model showed a significant mild correlation between the CISS score and the reading speed during the reading Stroop task ($R^2 = 0.08, p < 0.05$): the higher the CISS score, the slower the reading speed was. Yet, no significant correlation between the CISS score and the reading speed during the “Alouette” task ($p > 0.05$) was found. The linear regression model also showed a

significant moderate correlation between the CISS score and the Stroop interference effect (IE) ($R^2 = 0.11, p < 0.03$; Fig. 1).

To analyze the incidence of the reported near-vision symptoms as calculated by the CISS on the reading speed or the Stroop test results, we decided to divide the sample in two different groups, the nonsymptomatic subjects and the symptomatic subjects, using a cutoff point of higher than or equal to 16 at the CISS test to distinguish between subjects with symptoms relative to near vision from those without said symptoms.³⁵ Twenty-six subjects (50.98%) were classified as nonsymptomatic, and 25 subjects (49.02%) were classified as symptomatic. The Mann-Whitney U test did not show a significant difference between nonsymptomatic (mean group, 149.27 ± 24.53) and symptomatic subjects (mean group, 144.86 ± 23.69) in terms of reading speed (words per minute) during the Stroop reading task ($U = 291, p = 0.52$), but it did show a significant difference between nonsymptomatic (mean group, 29.48 ± 9.92 s) and symptomatic subjects (mean group, 36.92 ± 11.90 s) in terms of Stroop IE ($U = 184.5, p < 0.01$).

Correlations between the Optometric Results, Reading Speed, and Stroop Test Results

Each of the measured parameters of the reading and the Stroop tasks was cross correlated with each of the optometric measurements (CISS score; NPC; distance and near phoria; distance and near PFV, NFV, and TFV; monocular and binocular NPA; vergence and accommodative facility; NRA and PRA). No significant correlations were found between the Stroop Color Effect, the Denomination ER, the Interference ER, and the optometric findings ($p > 0.05$).

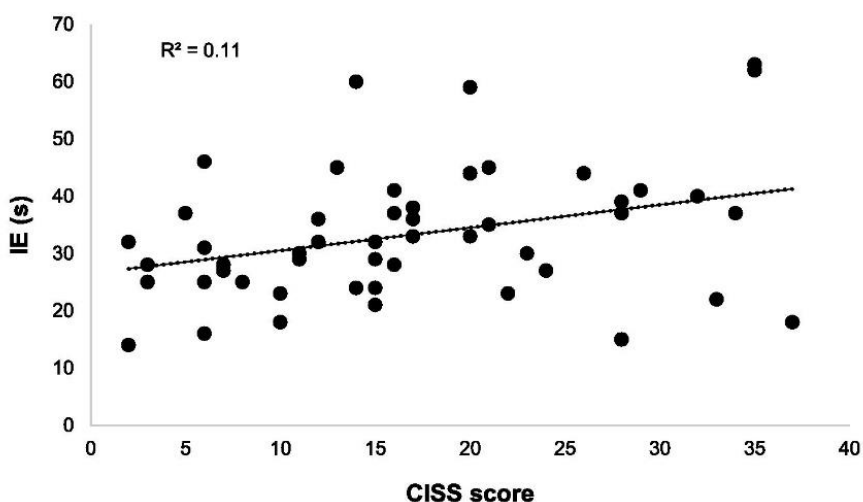


FIGURE 1. Linear regression plot of the interference effect (IE) in seconds (s) as a function of the Convergence Insufficiency Symptom Survey (CISS) score.

Linear regression results (r^2) in the entire group are shown in Table 3; significant correlations ($p < 0.05$) are marked with an asterisk.

Major Findings

Reading Measures versus Measures of Binocular and Accommodative Functions

We did not find significant correlations ($p > 0.05$) whether between reading speed, number of corrected or uncorrected errors, or ER and optometric results.

Interference Effect and Binocular Function

The linear regression model showed significant moderate correlations between the near PFV and the IE ($R^2 = 0.16$, $p < 0.004$) and between near TFV and IE ($R^2 = 0.18$, $p < 0.002$) in the Stroop test. The higher the vergence range, the better the performance in the interference task, that is, the interference time effect was smaller.

A significant mild correlation was also found in the same way between IE and NPC ($R^2 = 0.09$, $p < 0.03$): the closer the point of convergence shown by the subject, the more efficient he or she was for the interference task.

Applying a Bonferroni correction in terms of tests relative to near-vision binocular function (NPC, PFV, NFV, near phoria, calculated AC/A ratio, binocular accommodative and vergence facility), p values for significant correlation had to be lower than

0.007. Correlations between Stroop IE and near PFV and between Stroop IE and near TFV remain significant (Figs. 2 and 3).

Interference Effect and Accommodative Function

Significant mild correlations were found in the same way between IE and monocular NPA ($R^2 = 0.13$, $p < 0.01$) and between IE and binocular NPA ($R^2 = 0.11$, $p = 0.02$): the closer the point of accommodation or convergence the subject showed, the better his or her performance was for the interference task.

Applying Bonferroni correction in terms of tests relative to accommodative function (monocular and binocular accommodative facility, monocular NPA, NRA, and PRA), p values for significant correlation had to be lower than 0.01. Correlation between Stroop IE and monocular NPA remains significant (Fig. 4).

Interference and Reading Results in Subjects with and without Near Fixation Disparity

To analyze the potential incidence of fixation disparity, we divided our sample into two different groups: the one with subjects presenting no fixation disparity at near distance ($N = 44$) and the one with subjects presenting fixation disparity ($N = 7$). Four of them exhibited exo-disparity, and the other three exhibited eso-disparity. The Mann-Whitney U test did not show any significant difference between subjects with no fixation disparity and subjects presenting fixation disparity whether in terms of reading

TABLE 3.

Mean values relative to vergence and accommodative functions and their correlations (r^2) with reading speed, ER during reading tasks, and IE during the Stroop test in the entire sample

	Entire sample values		Bravais-Pearson's correlation results (r^2)				
	Mean	SD	"Alouette" reading speed	ER "Alouette"	Stroop reading speed	ER Stroop reading	Stroop IE
CISS Score	16.92	9.59	<0.01	0.01	0.08*	0.02	0.11*
NPC, cm	8.62	3.72	<0.01	0.02	0.01	<0.01	0.09*
Distance PH, PD	0.66	3.76	<0.01	0.01	<0.01	0.02	<0.01
Distance TFV, PD	21.78	7.21	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01
Distance NFV, PD	10.86	4.95	0.01	<0.01	0.03	<0.01	<0.01
Distance PFV, PD	10.92	5.64	0.04	<0.01	0.07	0.02	0.02
Near PH, PD	-1.80	5.67	0.01	<0.01	0.03	0.03	0.01
Near TFV, PD	35.75	8.80	0.01	0.02	0.03	<0.01	0.18*
Near NFV, PD	13.08	5.77	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.06
Near PFV, PD	22.67	6.21	0.04	0.06	0.06	<0.01	0.16*
NRA, D	1.80	0.41	0.02	<0.01	0.05	0.02	<0.01
PRA, D	2.53	1.47	0.01	0.07	<0.01	0.03	<0.01
Monocular NPA, D	9.89	2.47	<0.01	0.01	0.04	0.06	0.13*
Binocular NPA, D	11.89	2.84	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.11*
Monocular accommodative facility, c./min	7.54	5.95	0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
Binocular accommodative facility, c./min	6.45	5.19	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	0.01
Vergence facility, c./min	9.33	4.55	<0.01	<0.01	0.01	0.02	0.04

*Significant correlation ($p < 0.05$).

ER, error rate; IE, interference effect; NFV, negative fusional vergence; NPA, near point of accommodation; NPC, near point of convergence; NRA, negative relative accommodation; PFV, positive fusional vergence; PH, phoria; PRA, positive relative accommodation; SD, standard deviation; TFV, total fusional vergence.

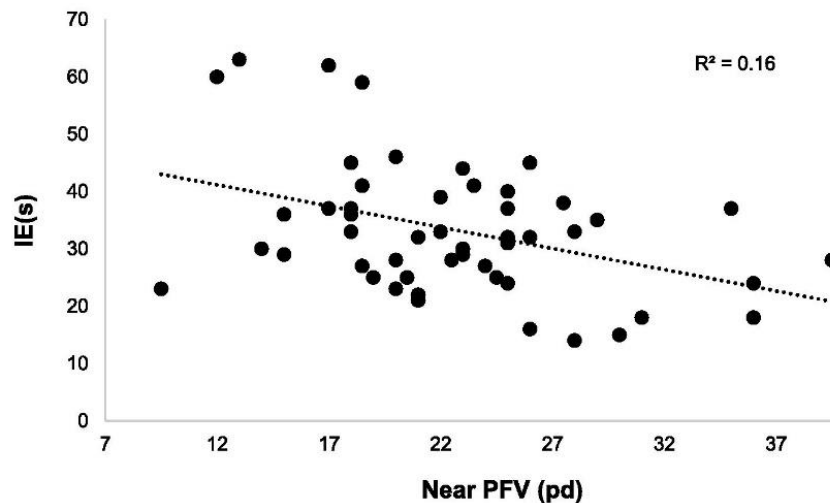


FIGURE 2. Linear regression plot of the interference effect (IE) in seconds (s) as a function of the near positive fusional vergence (Near PFV) in prism diopters (pd).

speed in the “Alouette” task (mean values, 149.6 ± 26.5 vs. 154.4 ± 51.1 ; $U = 146.0$, $p = 0.83$), in terms of reading speed with the Stroop reading task (mean values, 146.1 ± 19.5 vs. 153.1 ± 44.9 ; $U = 153.5$, $p = 0.98$), or in terms of Stroop IE values (mean values, 32.2 ± 10.3 s vs. 40.1 ± 16.6 s; $U = 103.5$, $p = 0.17$); there was no difference either between eso- and exo-disparity subjects ($p > 0.05$), although the two subgroups were of a small size.

Interference and Reading Results According to the Percival’s Criterion

Percival proposed a rule to anticipate visual discomfort in connection with fusion ranges: the point-of-zero demand should fall in the middle third of the TFV for comfortable binocular vision.⁴⁸ To analyze if meeting Percival’s criterion at near distance could have an incidence on reading speed or on Stroop interference performance,

we divided our sample into two different groups: one with subjects meeting Percival’s criterion ($N = 38$) and the other with subjects failing to meet Percival’s criterion ($N = 13$). The Mann-Whitney U test did not show any significant difference between subjects meeting Percival’s criterion and subjects failing to meet Percival’s criterion in terms of reading speed in the “Alouette” task (mean values, 145.7 ± 29.0 vs. 163.8 ± 31.2 ; $U = 172.5$, $p = 0.11$), in terms of reading speed in the Stroop reading task (mean values, 143.5 ± 20.6 vs. 157.3 ± 30.6 ; $U = 187.5$, $p = 0.19$), and in terms of Stroop IE (mean values, 32.36 ± 10.37 vs. 35.92 ± 14.45 ; $U = 211.5$, $p = 0.44$).

Interference and Reading Results According to Sheard’s Criterion

Sheard³⁷ also proposed a rule to anticipate vision discomfort regarding fusion ranges and phorias: the fusional vergence reserve

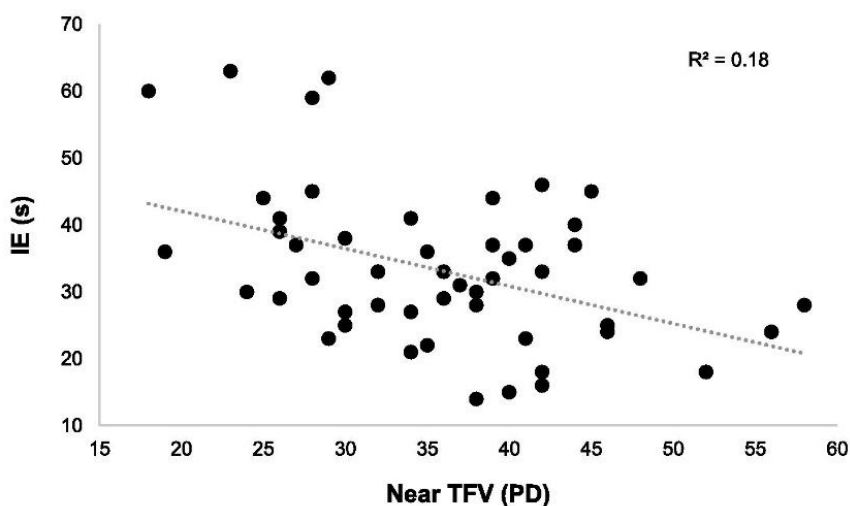


FIGURE 3. Linear regression plot of the interference effect (IE) in seconds as a function of the total fusional vergence (TFV) in prism diopters (PD).

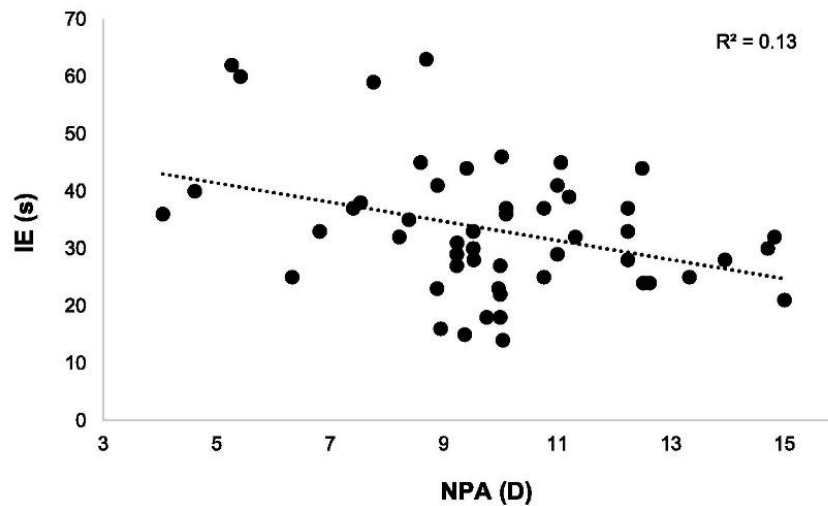


FIGURE 4. Linear regression plot of the interference effect (IE) in seconds (s) as a function of the monocular near point of accommodation (NPA) in diopters (D).

has to be at least twice the fusional vergence demand for comfortable binocular vision. To analyze if meeting Sheard’s criterion at near distance could have a relationship with reading speed or Stroop interference performance, we divided our sample into two different groups: one with subjects meeting the Sheard’s criterion (N = 37) and the other with subjects failing to meet Sheard’s criterion (N = 14, 9 with exophoria and 5 with esophoria). The Mann-Whitney U test did not show any significant difference between subjects meeting Sheard’s criterion and subjects failing to meet Sheard’s criterion in terms of reading speed in the “Alouette” task (149.7 ± 31.4 vs. 151.9 ± 28.6 ; $U = 237.5$, $p = 0.65$) and in terms of reading speed with the Stroop reading task (mean values, 146.6 ± 23.2 vs. 148.2 ± 26.7 ; $U = 242.0$, $p = 0.72$). Yet, there was a significant difference in terms of Stroop IE (30.27 ± 9.83 vs. 41.21 ± 12.14 ; $U = 116.0$, $p < 0.01$): subjects failing to meet Sheard’s criterion did not perform as well in the interference task, that is, their interference time effect was higher than that of the subjects meeting Sheard’s criterion (Fig. 5).

Results for Asymptomatic versus Symptomatic Subjects with Vergence or Accommodative Dysfunctions

Using the classification of Scheiman and Wick,⁴² we first classified vergence and accommodation dysfunctions by taking into account the number of signs used in the studies of Porcar and Martinez-Palomera¹⁸ and Shin et al.³ In addition, we decided to use the CISS as supplementary criteria to classify the symptomatic students. We took a cutoff point of higher than or equal to 16 to distinguish students with symptoms relative to near vision from those without such symptoms.³⁵

With this specific classification, we found three major groups in our sample: a control group (N = 18) with subjects presenting no accommodative or vergence dysfunctions and less than 16 at the CISS score; a symptomatic CI group (SCI group, N = 11) with subjects presenting CI and a CISS score higher than or

equal to 16; and a symptomatic accommodative excess group (SAE group, N = 7) with subjects presenting accommodative excess without vergence dysfunctions and a CISS score higher than or equal to 16.

Correlations in Each Group

Mean group values, standard deviations, and linear regressions (r^2) to search for correlations, with independent variables as the optometric results and the results of the experimental tests as the dependent variables, are shown for the control group (Table 4), the SCI group (Table 5), and the SAE group (Table 6). Significant correlations ($p < 0.05$) are marked with an asterisk.

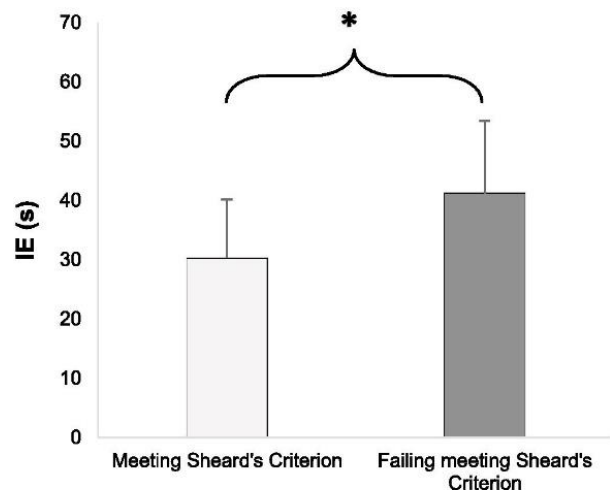


FIGURE 5. Mean values and standard deviations concerning interference effect (IE) in seconds (s) in subjects meeting Sheard’s criterion (N = 37) and in subjects failing to meet Sheard’s criterion (N = 14).

TABLE 4.

Mean values relative to vergence and accommodative functions and their correlations (r^2) with reading speed, ER during reading tasks, and IE during the Stroop test in the control group

	Control group values		Bravais-Pearson's correlation results (r^2)				
	Mean	SD	"Alouette" reading speed	ER "Alouette"	Stroop reading speed	ER Stroop reading	Stroop IE
CISS	10.39	4.33	0.19	0.02	0.23*	0.06	0.18
NPC, cm	7.33	2.91	0.01	0.03	<0.01	0.17	<0.01
Distance phoria, PD	1.16	4.03	0.07	0.17	0.03	0.02	0.04
Distance TFV, PD	23.33	7.77	0.01	<0.01	0.01	0.33*	0.01
Distance NFV, PD	11.83	5.79	0.05	0.06	<0.01	0.08	<0.01
Distance PFV, PD	11.5	5.02	0.01	0.05	0.01	0.33*	0.07
Near phoria, PD	-0.5	3.15	0.08	0.06	<0.01	0.02	<0.01
Near TFV, PD	39.22	9.97	0.22*	0.12	0.11	<0.01	0.17
Near NFV, PD	15.67	5.16	0.33*	0.09	0.06	<0.01	0.06
Near PFV, PD	23.56	6.75	0.06	0.08	0.09	<0.01	0.17
NRA, D	1.93	0.36	0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.02
PRA, D	2.54	1.33	0.24*	0.18	0.18	0.01	0.05
Monocular NPA, D	11.09	2.76	0.02	0.13	0.15	0.15	0.11
Binocular NPA, D	12.96	2.69	0.02	0.18	0.21	0.12	0.14
Monocular accommodative facility, c./min	11.28	6.09	<0.01	<0.01	0.01	0.04	0.05
Binocular accommodative facility, c./min	9.44	4.86	<0.01	0.08	0.02	0.05	0.05
Vergence facility, c./min	10.33	3.85	0.05	0.05	0.03	0.16	0.05

*Significant correlation ($p < 0.05$).

CISS, Convergence Insufficiency Symptom Survey; ER, error rate; IE, interference effect; NFV, negative fusional vergence; NPA, near point of accommodation; NPC, near point of convergence; NRA, negative relative accommodation; PFV, positive fusional vergence; PRA, positive relative accommodation; SD, standard deviation; TFV, total fusional vergence.

CISS Score

There was a significant mild correlation between the CISS score and the reading speed in the Stroop reading task in the control group ($R^2 = 0.23$, $p < 0.05$): the higher the CISS score, the slower the reading speed was. Yet, there was no significant correlation between the CISS score and reading speed in the "Alouette" task.

There was a significant moderate correlation between the CISS score and the IE in the Stroop test in the SCI group ($R^2 = 0.43$, $p < 0.03$): the higher the CISS score, the poorer the performance in the interference task was, that is, the interference time effect was longer.

Results Relative to the Binocular and Accommodative Functions

We applied a Bonferroni correction in terms of tests relative to near-vision binocular function (NPC, PFV, NFV, near phoria, calculated AC/A ratio, binocular accommodative and vergence facility) and in terms of tests relative to accommodative function (monocular and binocular accommodative facility, monocular NPA, NRA, and PRA). Values of p for significant correlation had to be lower than 0.007 regarding binocular function tests and lower than 0.01 regarding accommodative function tests.

Finally, only one correlation between the distance NFV and in the Stroop reading task ($R^2 = 0.59$, $p = 0.005$) remained significant in

the SCI group: the higher the distance NFV, the slower the reading speed was. Yet, there was no significant correlation between distance NFV and the reading speed in the "Alouette" task.

Comparisons Between Groups

To search for differences between the control group, the SCI group, and the SAE group in terms of optometric results, reading speed results, or Stroop IE results, we first used a nonparametric Kruskal-Wallis ANOVA test. As expected, significant differences between groups were found in terms of optometric results: CISS score, NPC, distance phoria, near phoria, near TFV, near NFV, both monocular and binocular NPA, and accommodative facilities, as shown in Table 7 by asterisks. For each significant difference noted, we used a nonparametric Mann-Whitney U test to compare a group with another one and confirm the Kruskal-Wallis ANOVA test results, as shown in Table 8 with significant differences marked with asterisks. Next, we will present the results in terms of reading and Stroop interference test values:

Reading Tasks

The nonparametric Kruskal-Wallis ANOVA test did not show significant differences between the groups in terms of:

- Reading speed in the "Alouette" task ($H(2) = 1.82$, $p = 0.40$)
- Reading speed in the Stroop reading task ($H(2) = 0.07$, $p = 0.97$)

TABLE 5.

Mean values relative to vergence and accommodative functions and their correlations (r^2) with reading speed, ER during reading tasks, and IE during the Stroop test in the SCI group

	SCI group values		Bravais-Pearson's correlation results (r^2)				
	Mean	SD	"Alouette" reading speed	ER "Alouette"	Stroop reading speed	ER Stroop reading	Stroop IE
CISS	23.55	8	0.29	0.02	0.31	0.03	0.43*
NPC, cm	11.36	3.04	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01
Distance PH, PD	-1.77	2.16	0.13	0.29	0.25	0.22	0.52*
Distance TFV, PD	19	5.48	0.15	0.02	0.07	0.12	0.02
Distance NFV, PD	8.68	3.7	0.47*	0.41*	0.59*	0.34	0.53*
Distance PFV, PD	10.32	4.47	0.01	0.14	0.09	<0.01	0.17
Near PH, PD	-8.45	3.3	0.05	0.36	0.09	0.13	0.11
Near TFV, PD	27.81	6.48	0.05	<0.01	<0.01	0.31	0.02
Near NFV, PD	7.09	3.76	0.48*	0.37*	0.48*	0.1	0.24
Near PFV, PD	20.73	6.76	0.03	0.16	0.11	<0.01	0.16
NRA, D	1.59	0.55	0.17	0.13	0.15	0.08	0.21
PRA, D	3.34	1.69	<0.01	0.05	0.01	0.05	0.01
Monocular NPA, D	8.56	2.2	0.09	0.02	0.09	0.06	0.11
Binocular NPA, D	10.28	2.99	<0.01	0.08	0.01	0.01	0.03
Monocular accommodative facility, c./min	5.91	4.98	0.08	0.09	0.05	0.17	0.13
Binocular accommodative facility, c./min	4.86	4.38	0.01	0.09	0.02	0.05	0.13
Vergence facility, c./min	6.86	4.48	<0.01	0.04	<0.01	0.19	0.02

*Significant correlation ($p < 0.05$).

CISS, Convergence Insufficiency Symptom Survey; ER, error rate; IE, interference effect; NFV, negative fusional vergence; NPA, near point of accommodation; NPC, near point of convergence; NRA, negative relative accommodation; PFV, positive fusional vergence; PH, phoria; PRA, positive relative accommodation; SCI, symptomatic convergence insufficiency; SD, standard deviation; TFV, total fusional vergence.

- ER in the "Alouette" task ($H(2) = 3.21$, $p = 0.20$)
- ER in the Stroop reading task ($H(2) = 0.19$, $p = 0.91$)

Stroop IE

The nonparametric Kruskal-Wallis ANOVA test showed a significant difference between the groups in terms of Stroop IE mean values ($H(2) = 10.18$, $p < 0.01$). The control group showed a significantly lower Stroop IE mean value than the SCI group ($U = 23.5$, $p < 0.01$). Yet, the SCI group and the SAE group did not show any significant difference in terms of Stroop IE mean values ($U = 23.5$, $p = 0.17$). Similarly, the control group and the SAE group did not show any significant difference in terms of Stroop IE mean values ($U = 56.5$, $p = 0.69$; Fig. 6).

DISCUSSION

The main finding of the study is that the larger the vergence amplitude, the weaker the interference effect in the Stroop test. The same correlation was also found between the measure of the total range of convergence and divergence combined and the score of the interference effect. Similarly, monocular NPA is also positively correlated with the interference score: the more remote the distance of accommodation, the lower the performance in the Stroop test. These results show that the amplitude of the response in vergence and accommodation evaluated by optometric tests is positively correlated with the performance of the cognitive executive functions,

as measured by the Stroop test. Importantly, vergence seemingly has no effect on reading speed.

Another important result is that subdivision of the subjects into three groups, the one with asymptomatic subjects showing normal binocular vision, the one with symptomatic subjects showing CI (SCI), and the one with symptomatic subjects showing AE (SAE) according to the classification of Scheiman and Wick,⁴² corroborates further the correlations presented above: the group with normal binocular vision shows significantly better performance in the Stroop interference test than the group with SCI.

Vergence and Interference Effect: Sensory Hypothesis

Vergence was measured with rotary prisms inducing binocular disparity, this vergence is driven by the detection of binocular disparity that stimulates the vergence oculomotor response. Binocular disparity is processed by many cortical areas (visual cortex, parietal and frontal lobe).⁴⁹⁻⁵¹ On the other hand, the cortical areas associated with cognitive control can be presented in two parts⁵²⁻⁵⁴: first, the top-down frontal cortex structures, including the dorsolateral prefrontal cortex, responsible for integrating information from other brain regions and initiating top-down response preference based on task demands, and the anterior cingulate cortex,^{55,56} responsible for conflict monitoring.⁵⁷ Second, there are also the response organization areas, including the posterior parietal cortex, modulating attentional orientation to task-relevant information and creating stimulus response mapping,⁵⁸ and the supplementary motor areas

TABLE 6.

Mean values relative to vergence and accommodative functions and their correlations (r^2) with reading speed, ER during reading tasks, and IE during the Stroop test in the SAE group

	SAE group values		Bravais-Pearson's correlation results (r^2)				
	Mean	SD	"Alouette" reading speed	ER "Alouette"	Stroop reading speed	ER Stroop reading	Stroop IE
CISS	26.43	16.28	0.24	0.41	0.09	0.16	0.21
NPC, cm	6.0	2.08	0.26	0.56	0.22	0.18	0.24
Distance phoria, PD	-0.79	2.12	0.04	0.43	0.09	0.06	0.62*
Distance TFV, PD	21	5.39	<0.01	0.02	0.26	0.11	0.02
Distance NFV, PD	8.93	1.37	0.22	0.55	0.17	0.12	0.02
Distance PFV, PD	12.07	4.90	0.03	<0.01	0.45	0.20	0.01
Near phoria, PD	-3.14	3.19	<0.01	0.22	0.16	<0.01	0.25
Near TFV, PD	34.71	5.77	0.15	0.01	0.23	<0.01	0.19
Near NFV, PD	10.71	5.16	0.47	0.31	0.33	0.08	0.05
Near PFV, PD	24.00	3.23	0.16	0.49	<0.01	0.17	0.19
NRA, D	1.64	0.32	0.14	0.02	<0.01	0.02	0.56
PRA, D	2.29	1.05	0.03	<0.01	0.02	0.52	0.06
Monocular NPA, D	10.74	1.22	0.39	0.52	0.05	0.07	0.08
Binocular NPA, D	13.41	1.54	0.03	0.09	0.13	0.43	0.09
Monocular accommodative facility, c./min	2.82	1.87	0.16	0.02	0.06	0.29	0.64*
Binocular accommodative facility, c./min	3.5	3.36	0.21	0.02	<0.01	0.15	0.02
Vergence facility, c./min	8.5	4.29	0.04	0.03	0.39	0.44	0.06

*Significant correlation ($p < 0.05$).

CISS, Convergence Insufficiency Symptom Survey; ER, error rate; IE, interference effect; NFV, negative fusional vergence; NPA, near point of accommodation; NPC, near point of convergence; NRA, negative relative accommodation; PFV, positive fusional vergence; PRA, positive relative accommodation; SAE, symptomatic accommodative excess; SD, standard deviation; TFV, total fusional vergence.

and the pre-supplementary motor areas, both play a role in the selection and the execution of responses.⁵⁹ Some of these areas are therefore highly involved in the cognitive task of inhibition as measured with the Stroop test: the dorsolateral prefrontal cortex, the anterior cingulate cortex, especially the dorsal subdivision, and the posterior parietal cortex.^{52,60-66} The correlation between vergence capability and Stroop performance could be attributed to the fact that these areas are highly involved in both tasks—vergence control and inhibition—which both require attention deployment. Note that our Stroop test was of a relatively short duration (100 items) and the subjects had only minor dysfunction in their binocular vision. We predict that further studies with longer tests and/or more severe dysfunctions of binocular vision would produce stronger correlations.

Complementary Hypothesis: Attentional-Motor Hypothesis

Based on the pre-motor theory of visual attention,³⁴ shifting attention is a by-product of saccade preparation. This theory could be enlarged to include vergence, which is also important for obtaining single binocular vision. If the control of vergence is poor, the eyes do not intersect at the appropriate depth. Consequently, single binocular vision is either delayed or reduced. Any deficiency in terms of vergence would thus provide a loose basis for focused attention interfering with the deployment of cognitive functions. The difference from the above pre-motor hypothesis is that the interference with the Stroop test is now at an advanced

level, the attention level, which is a prerequisite for visual processing and subsequent cognition. This hypothesis calls for further research with objective measures on the angle of vergence, on the coordination of the saccades, and on the accommodative response during the interference phase of the Stroop test.

Correlation between NPA and Interference Effect

Monocular NPA represents the closest point that the subject can still see clearly using maximum accommodation. This measurement is carried out in real space, as opposed to fusion ranges, which use rotary prisms and induce a conflict between vergence and accommodation. During the fusion range test, the angle of vergence had to vary to maintain single vision, but the accommodative response had to stay stable to maintain clear vision. The results of the NPA are similar to those of the fusion range test when compared with the interference effect: the closer the target, indicating the existence of a higher accommodative amplitude, the weaker the interference effect in the Stroop test. This correlation confirms that convergence and accommodation are both linked to cognitive executive function, as measured by the Stroop test.

Visual Symptoms

The significant correlation between CISS score and Stroop IE in the entire group and in the SCI group and the significant difference found between symptomatic and nonsymptomatic

TABLE 7.

Mean values and SDs relative to vergence and accommodative functions, the reading tasks, and the Stroop test in the control group, the SCI group, and the SAE group

	Control group		SCI group		SAE group		Kruskal-Wallis test results	
	Mean value	SD	Mean value	SD	Mean value	SD	H (2, N = 36)	p
CISS	10.39	4.33	23.55	8	26.43	16.28	26.51*	<0.01*
NPC, cm	7.33	2.91	11.36	3.04	6.0	2.08	13.58*	<0.01*
Distance PH, PD	1.16	4.03	-1.77	2.16	-0.79	2.12	6.32*	0.04*
Distance TFV, PD	23.33	7.77	19	5.48	21	5.39	2.23	0.33
Distance NFV, PD	11.83	5.79	8.68	3.7	8.93	1.37	3.96	0.14
Distance PFV, PD	11.5	5.02	10.32	4.47	12.07	4.90	0.62	0.73
Near PH, PD	-0.5	3.15	-8.45	3.3	-3.14	3.19	20.82*	<0.01*
Near TFV, PD	39.22	9.97	27.81	6.48	34.71	5.77	10.77*	<0.01*
Near NFV, PD	15.67	5.16	7.09	3.76	10.71	5.16	15.26*	<0.01*
Near PFV, PD	23.56	6.75	20.73	6.76	24.00	3.23	2.66	0.26
NRA, D	1.93	0.36	1.59	0.55	1.64	0.32	4.38	0.11
PRA, D	2.54	1.33	3.34	1.69	2.29	1.05	2.24	0.33
Monocular NPA, D	11.09	2.76	8.56	2.2	10.74	1.22	7.48*	0.02*
Binocular NPA, D	12.96	2.69	10.28	2.99	13.41	1.54	6.61*	0.04*
Monocular accommodative facility, c./min	11.28	6.09	5.91	4.98	2.82	1.87	12.50*	<0.01*
Binocular accommodative facility, c./min	9.44	4.86	4.86	4.38	3.5	3.36	9.98*	<0.01*
Vergence facility, c./min	10.33	3.85	6.86	4.48	8.5	4.29	3.06	0.22
Reading speed <i>L'Alouette</i>	141.52	24.45	149.37	27.60	151.48	40.79	1.82	0.40
ER "Alouette" reading	12.22	9.01	9.64	5.43	16.14	8.05	3.21	0.20
Stroop reading speed	142.59	22.52	141.83	19.67	143.62	19.38	0.07	0.97
ER Stroop reading	0.22	0.43	0.27	0.65	0.14	0.38	0.19	0.91
Stroop IE	29.11	10.48	41.91	10.89	32	10.85	10.18*	<0.01*

The associated results of the nonparametric Kruskal-Wallis ANOVA between the three groups are shown (H and p value).

*Significant difference.

ANOVA, analysis of variance; CISS, Convergence Insufficiency Symptom Survey; ER, error rate; IE, interference effect; NFV, negative fusional vergence; NPA, near point of accommodation; NPC, near point of convergence; NRA, negative relative accommodation; PFV, positive fusional vergence; PH, phoria; PRA, positive relative accommodation; SAE, symptomatic accommodative excess; SCI, symptomatic convergence insufficiency; SD, standard deviation; TFV, total fusional vergence.

subjects in the entire sample suggest that the CISS score could be a good indicator in terms of cognitive executive function results: symptoms are negatively correlated to the Stroop interference performance. This has a clinical interest, especially for young students, revealing that every vision disorder that leads to symptoms in near vision should be managed, as inhibition measured with the Stroop test is linked with attention, memory, and comprehension in reading, even if the automatic reading skills at first appear to be correct. However, using another scale, like the College of Optometrists in Vision Development Quality of Life questionnaire,⁶⁷ would have been wise to compare these results with a more general grading scale of symptoms.

The Relationship with Vergence Dysfunction

To the best of our knowledge, this is the first time a significant inferiority on executive functions as measured in the interference phase of the Stroop test has been found in symptomatic subjects with CI (SCI) compared with nonsymptomatic subjects with normal binocular vision (control group). Interestingly, no significant difference was found between the control group and the symptomatic subjects showing AE (SAE) in terms of Stroop test results. The CISS score appeared to be a good indicator of cognitive executive function, but the results reveal that a vergence

problem like CI tends to have a higher effect on cognitive executive function than an accommodative problem like AE.

This has clinical implications and opens frontiers between the clinical practices of optometry, ophthalmology, and neuropsychology. First of all, it provides ergonomic and clinical indications for managing vergence problems to maintain optimal cognitive functions. Second, the Stroop test is also usually used to diagnose dyslexia or ADHD in children. We suggest that vergence and accommodative functions have to be evaluated systematically because low vergence capabilities can reduce the quality of visual processing and the quality of focused attention and thereby interfere with cognitive executive functions.

Why Isn't Reading Affected?

Mild significant correlations were found between optometric results and reading speed or error rate during the reading tasks in some groups, but not in the entire sample. Moreover, significant correlations between reading speed and optometric results only concerned one of the two reading tests ("Alouette" or Stroop reading task) and not both at the same time, as did error rate. Finally, comparisons between the three major groups did not show any significant differences in terms of reading speed or error rate. During the reading test *L'Alouette* or the color reading task of the Stroop test, no comprehension or

memorization was demanded. Therefore, these two tasks were less cognitive demanding than the Stroop interference task. Consequently, we can suggest that vergence dysfunctions can lead to problems when the cognitive demand is higher than for simple automatic reading tasks.

Optometry Testing and the Weight of Meeting Sheard’s Criterion

Throughout the optometric testing procedure, we used about 20 different tests to evaluate accommodative function, binocular function, and their synergy. Yet, the results indicate that only a few of them are important relative to cognitive executive function: vergence ranges, monocular accommodative ranges, NPC, and phorias. These tests are necessary to detect the basic dysfunctions

TABLE 8.

Nonparametric Mann-Whitney U test results for comparison between the control group, the SCI group, and the SAE group to confirm the nonparametric Kruskal-Wallis ANOVA test results

Test	Groups	Mann-Whitney U test result	p
CISS	SCI vs. control	0.00	<0.01*
	SCI vs. SAE	30.0	0.44
	SAE vs. control	0.00	<0.01*
NPC	SCI vs. control	30.5	<0.01*
	SCI vs. SAE	4.00	<0.01*
	SAE vs. control	46.5	0.32
Distance phoria	SCI vs. control	45.0	0.02*
	SCI vs. SAE	30.5	0.47
	SAE vs. control	41.5	0.19
Near phoria	SCI vs. control	4.5	<0.01*
	SCI vs. SAE	6.0	<0.01*
	SAE vs. control	35.5	0.09
Near TFV	SCI vs. control	31.0	<0.01*
	SCI vs. SAE	14.5	0.03*
	SAE vs. control	44.0	0.25
Near NFV	SCI vs. control	16.5	<0.01*
	SCI vs. SAE	18.0	0.06
	SAE vs. control	32.5	0.06
Monocular NPA	SCI vs. control	43.5	0.01*
	SCI vs. SAE	15	0.03*
	SAE vs. control	53.5	0.57
Monocular accommodative facility	SCI vs. control	48.5	0.02*
	SCI vs. SAE	26.0	0.26
	SAE vs. control	8.5	<0.01*
Binocular accommodative facility	SCI vs. control	47.0	0.02*
	SCI vs. SAE	36.5	0.86
	SAE vs. control	16.5	<0.01*
Stroop IE	SCI vs. control	23.5	<0.01*
	SCI vs. SAE	23.5	0.17
	SAE vs. control	56.5	0.69

*Significant difference.

ANOVA, analysis of variance; CISS, Convergence Insufficiency Symptom Survey; IE, interference effect; NFV, negative fusional vergence; NPA, near point of accommodation; NPC, near point of convergence; SAE, symptomatic accommodative excess; SCI, symptomatic convergence insufficiency; TFV, total fusional vergence.

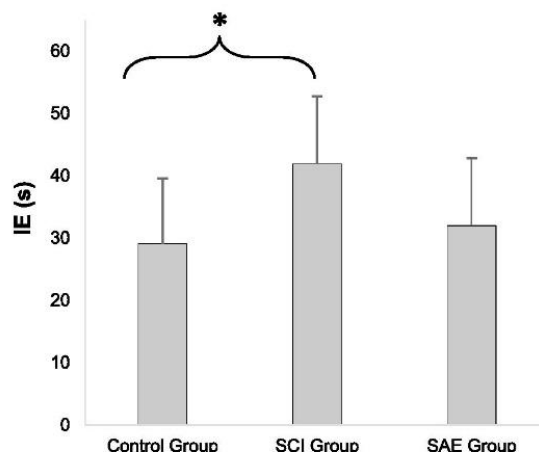


FIGURE 6.

Mean values and standard deviations concerning interference effect (IE) in seconds (s) in the control group (N = 18), in the symptomatic convergence insufficiency group (SCI Group, N = 11), and in the symptomatic accommodative excess group (SAE Group, N = 7).

and show the quality of the response in convergence, divergence, and accommodation. Moreover, meeting Sheard’s criterion at near distance seemed to be a good indicator in terms of the results of the interference phase of the Stroop test. This physiological measurement, calculated by linking phoria to the fusion ranges and basically reflecting the comfort in sustained vision tasks, is also closely linked with cognitive executive functions. This strengthens the overall message of this study: both the quality of vergence and accommodation are linked with cognitive executive functions.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank Dr. Chrystal Gaertner for her help during the statistical analysis and Huw Ryan and Antonia Arany for English proofing the manuscript. We also thank the anonymous reviewers for their helpful and constructive criticisms.

Received May 12, 2015; accepted September 10, 2015.

REFERENCES

1. Ciuffreda KJ. The scientific basis for and efficacy of optometric vision therapy in nonstrabismic accommodative and vergence disorders. *Optometry* 2002;73:735–62.
2. Borsting E, Rouse MW, Deland PN, Hovett S, Kimura D, Park M, Stephens B. Association of symptoms and convergence and accommodative insufficiency in school-age children. *Optometry* 2003;74:25–34.
3. Shin HS, Park SC, Park CM. Relationship between accommodative and vergence dysfunctions and academic achievement for primary school children. *Ophthalmic Physiol Opt* 2009;29:615–24.
4. Hoffman LG. Incidence of vision difficulties in children with learning disabilities. *J Am Optom Assoc* 1980;51:447–51.
5. Garzia R. The relationship between visual efficiency problem and learning. In: Scheiman M, ed. *Optometric Management of Learning Related Vision Problems*. St. Louis: Mosby; 1994:153–75.
6. Castanes MS. Major review: the underutilization of vision screening (for amblyopia, optical anomalies and strabismus) among preschool age children. *Binocul Vis Strabismus Q* 2003;18:217–32.

7. Maples WC. Visual factors that significantly impact academic performance. *Optometry* 2003;74:35–49.
8. Vaughn W, Maples WC, Hoenes R. The association between vision quality of life and academics as measured by the College of Optometrists in Vision Development Quality of Life questionnaire. *Optometry* 2006;77:116–23.
9. Grisham D, Powers M, Riles P. Visual skills of poor readers in high school. *Optometry* 2007;78:542–9.
10. Kedzia B, Tondel G, Pieczyrak D, Maples WC. Accommodative facility test results and academic success in Polish second graders. *J Am Optom Assoc* 1999;70:110–6.
11. Kiely PM, Crewther SG, Crewther DP. Is there an association between functional vision and learning to read? *Clin Exp Optom* 2001;84:346–53.
12. Blika S. Ophthalmological findings in pupils of a primary school with particular reference to reading difficulties. *Acta Ophthalmol (Copenh)* 1982;60:927–34.
13. Eames TH. Low fusion convergence as a factor in reading disability. *Am J Ophthalmol* 1934;17:709–10.
14. Park G, Burri C. The relationship of various eye conditions and reading achievement. *J Ed Psychol* 1943;34:290–9.
15. Palomo-Alvarez C, Puell MC. Binocular function in school children with reading difficulties. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2010;248:885–92.
16. Hokoda SC. General binocular dysfunctions in an urban optometry clinic. *J Am Optom Assoc* 1985;56:560–2.
17. Lara F, Cacho P, García A, Megías R. General binocular disorders: prevalence in a clinic population. *Ophthalmic Physiol Opt* 2001;21:70–4.
18. Porcar E, Martinez-Palomera A. Prevalence of general binocular dysfunctions in a population of university students. *Optom Vis Sci* 1997;74:111–3.
19. Cooper J, Duckman R. Convergence insufficiency: incidence, diagnosis, and treatment. *J Am Optom Assoc* 1978;49:673–80.
20. Kent PR, Steeve JH. Convergence insufficiency, incidence among military personnel and relief by orthoptic methods. *Mil Surg* 1953;112:202–5.
21. Norn MS. Convergence insufficiency—incidence in ophthalmic practice. Results of orthoptic treatment. *Acta Ophthalmol* 1966;44:132–8.
22. Duane A. A new classification of motor anomalies of the eye based upon physiological principles. *Ann Ophthalmol Otolaryngol* 1886;247–60.
23. Bucci MP, Kapoula Z, Bui-Quoc E, Bouet A, Wiener-Vacher S. Saccades and vergence performance in a population of children with vertigo and clinically assessed abnormal vergence capabilities. *PLoS One* 2011;6:e23125.
24. Gaertner C, Bucci MP, Ajrezo L, Wiener-Vacher S. Binocular coordination of saccades during reading in children with clinically assessed poor vergence capabilities. *Vision Res* 2013;87:22–9.
25. Alvarez TL, Kim EH. Analysis of saccades and peak velocity to symmetrical convergence stimuli: binocularly normal controls compared to convergence insufficiency patients. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2013;54:4122–35.
26. Alvarez TL, Jaswal R, Gohel S, Biswal BB. Functional activity within the frontal eye fields, posterior parietal cortex, and cerebellar vermis significantly correlates to symmetrical vergence peak velocity: an ROI-based, fMRI study of vergence training. *Front Integr Neurosci* 2014;8:50.
27. White JW, Brown HW. Occurrence of vertical anomalies associated with convergent and divergent anomalies—a clinical study. *Arch Ophthalmol* 1939;21:999–1009.
28. Borsting E, Rouse M, Chu R. Measuring ADHD behaviors in children with symptomatic accommodative dysfunction or convergence insufficiency: a preliminary study. *Optometry* 2005;76:588–92.
29. Protopoulos A, Archonti A, Skaloumbakas C. Reading ability is negatively related to Stroop interference. *Cogn Psychol* 2007;54:251–82.
30. Stroop JR. Studies of interference in serial verbal reactions. *J Exp Psychol* 1935;18:643–62.
31. MacLeod CM. Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review. *Psychol Bull* 1991;109:163–203.
32. Cain K. Individual differences in children's memory and reading comprehension: an investigation of semantic and inhibitory deficits. *Memory* 2006;14:553–69.
33. Ikeda Y, Okuzumi H, Kokubun M. Stroop/reverse-Stroop interference in typical development and its relation to symptoms of ADHD. *Res Dev Disabil* 2013;34:2391–8.
34. Rizzolatti G, Riggio L, Dascola I, Umiltà C. Reorienting attention across the horizontal and vertical meridians: evidence in favor of a premotor theory of attention. *Neuropsychologia* 1987;25:31–40.
35. Rouse M, Borsting E, Mitchell GL, Cotter SA, Kulp M, Scheiman M, Barnhardt C, Bade A, Yamada T; Convergence Insufficiency Treatment Trial (CITT) Investigator Group. Validity of the convergence insufficiency symptom survey: a confirmatory study. *Optom Vis Sci* 2009;86:357–63.
36. Goss DA. *Ocular Accommodation, Convergence, and Fixation Disparity: A Manual of Clinical Analysis*, 2nd ed. Newton, MA: Butterworth-Heinemann; 1995.
37. Sheard C. Zones of ocular comfort. *Am J Optom* 1930;7:9–25.
38. Gall R, Wick B, Bedell H. Vergence facility: establishing clinical utility. *Optom Vis Sci* 1998;75:731–42.
39. Buzzelli AR. Vergence facility: developmental trends in a school age population. *Am J Optom Physiol Opt* 1986;63:351–5.
40. Pellizzer S, Siderov J. Assessment of vergence facility in a sample of older adults with presbyopia. *Optom Vis Sci* 1998;75:817–21.
41. Morgan MW. Analysis of clinical data. *Am J Optom Arch Am Acad Optom* 1944;21:477–91.
42. Scheiman M, Wick B. *Clinical Management of Binocular Vision: Heterophoric, Accommodative and Eye Movement Disorders*, Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins; 2002.
43. Lefavrais P. *Test de l'Alouette*, 2nd ed. Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée; 1967.
44. Debray P, Debray Q, Binoche T, Nebout MC. An advance in leximetry: proportional assessment of the Alouette test. *Rev Neuropsychiatr Infant* 1972;20:725–32.
45. Kapoula Z, Lê TT, Bonnet A, Bourtoire P, Demule E, Fauvel C, Quilicci C, Yang Q. Poor Stroop performances in 15-year-old dyslexic teenagers. *Exp Brain Res* 2010;203:419–25.
46. Jensen AR, Rohwer WD, Jr. The Stroop color-word test: a review. *Acta Psychol (Amst)* 1966;25:36–93.
47. Stuss DT, Floden D, Alexander MP, Levine B, Katz D. Stroop performance in focal lesion patients: dissociation of processes and frontal lobe lesion location. *Neuropsychologia* 2001;39:771–86.
48. Sheedy JE, Saladin JJ. Association of symptoms with measures of oculomotor deficiencies. *Am J Optom Physiol Opt* 1978;55:670–6.
49. Mays LE. Neural control of vergence eye movements: convergence and divergence neurons in midbrain. *J Neurophysiol* 1984;51:1091–108.
50. Judge SJ, Cumming BG. Neurons in the monkey midbrain with activity related to vergence eye movement and accommodation. *J Neurophysiol* 1986;55:915–30.

51. Leigh RG, Zee DS. *The Neurology of Eye Movements*, 4th ed. New York: Oxford University Press; 2006.
52. Milham MP, Banich MT, Claus ED, Cohen NJ. Practice-related effects demonstrate complementary roles of anterior cingulate and prefrontal cortices in attentional control. *Neuroimage* 2003;18:483–93.
53. Aron AR. The neural basis of inhibition in cognitive control. *Neuroscientist* 2007;13:214–28.
54. Wang L, Liu X, Guise KG, Knight RT, Ghajar J, Fan J. Effective connectivity of the fronto-parietal network during attentional control. *J Cogn Neurosci* 2010;22:543–53.
55. Miller EK, Cohen JD. An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annu Rev Neurosci* 2001;24:167–202.
56. Brass M, Derrfuss J, Forstmann B, von Cramon DY. The role of the inferior frontal junction area in cognitive control. *Trends Cogn Sci* 2005;9:314–6.
57. Botvinick MM, Cohen JD, Carter CS. Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends Cogn Sci* 2004;8:539–46.
58. Coulthard EJ, Nachev P, Husain M. Control over conflict during movement preparation: role of posterior parietal cortex. *Neuron* 2008;58:144–57.
59. Nachev P, Kennard C, Husain M. Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor areas. *Nat Rev Neurosci* 2008;9:856–69.
60. Banich MT, Milham MP, Atchley RA, Cohen NJ, Webb A, Wszalek T, Kramer AF, Liang Z, Barad V, Gullett D, Shah C, Brown C. Prefrontal regions play a predominant role in imposing an attentional “set”: evidence from fMRI. *Brain Res Cogn Brain Res* 2000;10:1–9.
61. Banich MT, Milham MP, Atchley R, Cohen NJ, Webb A, Wszalek T, Kramer AF, Liang ZP, Wright A, Shenker J, Magin R. fMRI studies of Stroop tasks reveal unique roles of anterior and posterior brain systems in attentional selection. *J Cogn Neurosci* 2000;12:988–1000.
62. Banich MT, Milham MP, Jacobson BL, Webb A, Wszalek T, Cohen NJ, Kramer AF. Attentional selection and the processing of task-irrelevant information: insights from fMRI examinations of the Stroop task. *Prog Brain Res* 2001;134:459–70.
63. Milham MP, Banich MT, Webb A, Barad V, Cohen NJ, Wszalek T, Kramer AF. The relative involvement of anterior cingulate and prefrontal cortex in attentional control depends on nature of conflict. *Brain Res Cogn Brain Res* 2001;12:467–73.
64. Milham MP, Erickson KI, Banich MT, Kramer AF, Webb A, Wszalek T, Cohen NJ. Attentional control in the aging brain: insights from an fMRI study of the stroop task. *Brain Cogn* 2002;49:277–96.
65. Barch DM, Braver TS, Akbudak E, Conturo T, Ollinger J, Snyder A. Anterior cingulate cortex and response conflict: effects of response modality and processing domain. *Cereb Cortex* 2001;11:837–48.
66. Mohanty A, Engels AS, Herrington JD, Heller W, Ho MH, Banich MT, Webb AG, Warren SL, Miller GA. Differential engagement of anterior cingulate cortex subdivisions for cognitive and emotional function. *Psychophysiology* 2007;44:343–51.
67. Maples WC. Test-retest reliability of the College of Optometrists in Vision Development Quality of Life Outcomes Assessment short form. *J Optom Vis Dev* 2002;33:126–34.

François Daniel
Zoi Kapoula

IRIS Group-CNRS FR3636

UFR Biomedicale

Université Paris Descartes 45 rue des Saints Pères

75006 Paris

France

e-mail: fdaniel.optometry@gmail.com; zoi.kapoula@gmail.com

Etude 2

Impact of Induced Vergence/Accommodation Conflict on Reading Saccades and Cognition

Submitted to Journal of vision.

Etude 3

Benefits from Vergence Rehabilitation: Evidence for Improvement of Reading Saccades and Fixations

François Daniel, Aurélien Morize, Dominique Brémond-Gignac and Zoï Kapoula



Benefits from Vergence Rehabilitation: Evidence for Improvement of Reading Saccades and Fixations

François Daniel^{1*†}, Aurélien Morize^{1*†}, Dominique Brémond-Gignac^{1,2} and Zoï Kapoula^{1*}

¹IRIS Group, Physiopathologie de la Vision et Motricité Binoculaire Centre National de la Recherche Scientifique FR3636 Université Paris Descartes, Paris, France, ²Ophthalmology Service, Hôpital Necker - Enfants Malades, Paris, France

OPEN ACCESS

Edited by:

Carlo Miniussi,
University of Trento, Italy

Reviewed by:

Andreas Sprenger,
University Luebeck, Germany
John Frederick Stein,
University of Oxford, UK

*Correspondence:

François Daniel
fdaniel.optometry@gmail.com
Aurélien Morize
aurelien.morize@gmail.com
Zoï Kapoula
zoi.kapoula@gmail.com

[†]These authors have contributed
equally to this work.

Received: 02 May 2016

Accepted: 30 September 2016

Published: 20 October 2016

Citation:

Daniel F, Morize A, Brémond-Gignac D
and Kapoula Z (2016) Benefits from
Vergence Rehabilitation: Evidence for
Improvement of Reading Saccades
and Fixations.
Front. Integr. Neurosci. 10:33.
doi: 10.3389/fnint.2016.00033

We hypothesize that binocular coordination of saccades is based on continuous neuroplasticity involving interactions of saccades and vergence. To test this hypothesis we study reading saccades in young students who were diagnosed for vergence disorders before and after vergence rehabilitation. Following orthoptic evaluation and symptomatology screening, 5 weekly sessions of vergence rehabilitation were applied with the REMOBI vergence double step protocole (see Kapoula et al., 2016). Using the Eyeseecam videoculography device we measured vergence as well as saccades and fixations during a reading test four times: at the beginning and at the end of the first and of the fifth vergence rehabilitation session. The results show elimination of symptoms, improvement of clinical orthoptic scores, and importantly increase of measured vergence gain and reduction of inter-trial variability. Improvement of the vergence was associated to a decrease of the disconjugacy of saccades during reading but also to shortening of fixation durations, to reduction of the number of regressive saccades and to a better correction of the intra-saccadic disconjugacy during the following fixation. The results corroborate the hypothesis of neuroplasticity based on saccade vergence interaction in young adults. It validates the clinical validity of the vergence double-step REMOBI method as a means to improve both, vergence and reading performances. It opens a new research approach on the link between fine binocular coordination of saccades, quality of the vergence response, attention, cognition and reading.

Keywords: cognition, rehabilitation, reading saccades, vergence eye movements, fixation

INTRODUCTION

The visual task of reading requires well-coordinated eye movements. To bring one word after another onto the fovea, the eyes have to execute several horizontal saccades while maintaining the angle of vergence stable, as reading is essentially a close distance activity, requiring precise fixation of the words. The task of reading needs quality of binocular coordination of the saccades, as poor binocular coordination of saccades during reading may result in fixation disparity (Evans, 2002; Blythe et al., 2006; Kliegl et al., 2006; Liversedge et al., 2006; Nuthmann and Kliegl, 2009; Jainta et al., 2010).

The quality of binocular coordination depends on vergence control and neuroplasticity. It is characterized by the measure of disconjugacy during and after the saccades, i.e., the difference

of amplitude between the two eyes. Saccades in healthy adult humans are not perfectly well coordinated (see Kapoula et al., 1986; Collewijn et al., 1988). Indeed, because of the asymmetry of the oculomotor plant (difference in muscles and/or in innervations relays), a central saccade command concerning the two eyes (in obedience with Hering's law) could still result in a saccade that is slightly larger in the abducting than in the adducting eye (see Collewijn et al., 1988). Binocular coordination is monitored by learning and neuroplasticity, evidence for this was first presented by Fioravanti et al. (1995), who reported that binocular coordination of saccades is poor in young children, but improves with age. Interestingly, Yang and Kapoula (2003) also found that the disconjugacy during saccades in children was much more variable than that for adults. Similar results have been shown during a reading task (Blythe et al., 2006). Therefore, the development of binocular coordination appears to be driven by visual experience and is based on neural plasticity/maturation. Yang and Kapoula (2003) hypothesized that the central nervous system learns to couple together with the saccade a fast vergence command that helps to reduce the abduction adduction asymmetry, at near vision, when the eyes are already maintaining convergence angle, learning to produce appropriate intra-saccadic convergence appears to be more difficult.

In the context of this theoretical framework, we hypothesized that ocular motor training improving vergence and accommodation in persons with vergence and accommodation disorders should lead to a benefit for the binocular coordination of saccades. Orthoptics training not only increases vergence capacities and reduces the number of symptoms (Griffin, 1987; Von Noorden, 2002; Cooper and Feldman, 2009; Scheiman et al., 2009), but also improves binocular coordination during and after the saccades (Bucci et al., 2006). This was shown for children with vertigo and vergence disorders. Gaertner et al. (2013) also showed that traditional orthoptic training objectively improved vergence performances and the binocular coordination of saccades during reading comparing saccades before and after orthoptics, with decrease of their disconjugacy. However, the texts used were short (single sentence), and consequently the appraisal of the reading speed and of the quality of coordination over time could not be investigated with precision.

Subjects showing convergence insufficiency (CI) and undergoing vergence rehabilitation were the focus of the recent studies of Alvarez et al. (2010, 2014) and Alvarez and Kim (2013). The main results showed that before the vergence training, CI subjects showed less symmetrical peak velocity between the left and the right eye than controls. Another fMRI study by the same authors examined functional activity of the cortical areas such as Frontal Eye Field (FEF), Posterior Parietal Cortex (PPC), and Cerebellar Vermis (CV), which are implicated in convergence programming: activity was reduced in CI subjects compared to controls. Moreover, after the vergence training, the peak velocity was significantly more symmetrical than before in CI subjects and this was correlated to the increase in the functional activity within the FEF, the PPC and the CV. The authors propose that saccade may be a compensatory mechanism used by CI subjects when convergence peak velocity is reduced. This idea is also

compatible with the concept of neural plasticity and vergence and saccades interactions.

The goal of the present study is to test to what extent rehabilitation of vergence eye movement along the medial plan would improve the quality of binocular coordination of saccades when reading in young adults diagnosed with vergence disorders. Orthoptic training is based on empirical exercises (such as pen push-ups, or prism bar exercises) and the practice can vary from one practitioner to the other. A major attribute of the present study is that vergence disorder is rehabilitated with a research based method (Double step vergence protocol with the REMOBI device, see Figure 2; Kapoula et al., 2016). A precise rehabilitation protocol is applied with targets in the real 3D space, designed with specific time and space constraints. Rehabilitation involved a total amount of 2200 vergence movements performed in 5 sessions of 35 min each.

Dusek et al. (2011) showed that reading speed increased significantly in children diagnosed with CI who were treated with orthoptics in contrast to children who did not follow orthoptics. Increase of reading speed could have been induced by shorter fixation duration but this was not investigated in this study. A second objective of the present study is to check if and how rehabilitation of vergence could eventually improve not only the binocular coordination of saccades but also other parameters such as fixation duration that reflects cognitive process. Improving vergence capabilities could improve cognitive executive functions (Daniel and Kapoula, 2016).

A third objective is to focus on both, the short term and the long term effects of vergence rehabilitation and their consequences on reading, saccades and fixations. Short term rehabilitation effects have been reported in studies of binocular coordination of saccades (Eggert and Kapoula, 1995; Kapoula et al., 1995). For instance, it was demonstrated the existence of a short term adaptive saccade disconjugacy using a magnifier glass (10%) in front of one eye. In the present study, we investigate if a short term training of 35 min of vergence could influence the quality of binocular coordination of saccades and fixations immediately afterwards. We will call "short term effects" the effects occurring within a single session of rehabilitation, i.e., between the two reading trials run before and after the same session of vergence rehabilitation. We will also search for "long term effects" by comparing reading trials before and after the complete rehabilitation program, consisted of 5 weekly sessions of 35 min each.

MATERIALS AND METHODS

Subjects

Nine students (4 males, 5 females, aged 25.7 ± 9.7) diagnosed with vergence disorders by orthoptic examination (for more details, see Kapoula et al., 2016), showing high symptomatology scores (≥ 20 at the Convergence Insufficiency Symptom Survey, CISS, Rouse et al., 2004) and recruited mostly in a technical secondary school specialized in optics (*Lycée Fresnel*, Paris), underwent a rehabilitation of vergence eye movements. Training was done once a week at a rate of 35 min each time, during 5 weeks (for more details, see Kapoula et al., 2016). We also tested

TABLE 1 | Orthoptic screening.

Subject	NPC			Divergence range		Convergence range		CISS score	
	Before	After		Before	After	Before	After	Before	After
1	5	5	Far Near	4 10	4 10	10 30	16 30	21	19
2	8	5	Far Near	16 18	16 18	18 35	25 35	30	13
3	6	5	Far Near	8 12	8 12	10 16	40 40	35	4
4	15	–	Far Near	6 10	– –	6 12	– –	34	17
5	5	3	Far Near	4 6	4 6	14 30	25 40	32	21
6	5	6	Far Near	4 8	6 8	16 20	16 25	13	9
7	5	5	Far Near	6 14	4 12	14 25	40 25	32	31
8	5	5	Far Near	6 12	10 14	20 25	20 25	26	12
9	10	5	Far Near	6 6	6 14	8 12	20 18	25	12
Mean (\pm SD)	7 (\pm 3)	5 (\pm 1)	Far Near	7 (\pm 4) 11 (\pm 4)	7 (\pm 4) 12 (\pm 4)	13 (\pm 5) 23 (\pm 8)	25 (\pm 10) 30 (\pm 8)	27.6 (\pm 7.1)	15.3 (\pm 7.8)

3 additional control subjects (2 males, 1 female, aged 21 ± 1) for one session of reading tests.

The investigation adhered to the tenets of the Declaration of Helsinki and was approved by the local human experimentation committee, the “Comité de Protection des Personnes” (CPP) Ile de France VI (No: 07035), Necker Hospital in Paris, France. Informed written consent was obtained from subject.

Orthoptic Screening

Orthoptic screening was done for all the subjects before the rehabilitation started, on separate days. A second orthoptic examination was done 1 month after the end of the vergence training, on a different day, to evaluate the evolution after the treatment in different areas. Subject 4 missed the last examination. Major results are shown on Table 1.

Reading Test, Vergence Tests, and Eye Movements Recording

Four trials of a reading test were recorded: the first and the second ones respectively at the beginning and the end of the first session of rehabilitation run with the REMOBI device, and the third and the fourth ones respectively at the beginning and the end of the fifth session of rehabilitation. The organization of all the

sequences of reading tests, vergence tests and vergence training sessions is shown on Figure 1.

Reading Test

We asked every subject to read silently a whole text at their own speed and raise a finger when they had finished. We used the Alouette test, a 265-word text in French (Lefavrais, 1967; Debray et al., 1972), firstly developed for children suspected of dyslexia, to evaluate their basic reading skills, but not their comprehension or memory. It was printed in courier font size 12 and each letter was about 0.3° of angular size, and was fixed on a wall, in front of the sited subject, at 40 cm distance (see Figure 2). The reading test was chosen considering the repeatability, as we wanted to limit the training effect. Even if the Alouette test was basically designed to diagnosed problems of reading like dyslexia in children and therefore implicates to read it aloud, this text is interesting as it is composed with sentences that are not connected with each other and with non-common words. As a result, this text doesn't have any meaning, and memorization or anticipation are not facilitated. It permits an evaluation of the automatic task of reading. Objective eye movement recording is therefore important to ensure that every word of the Alouette text was fixated and the analysis of

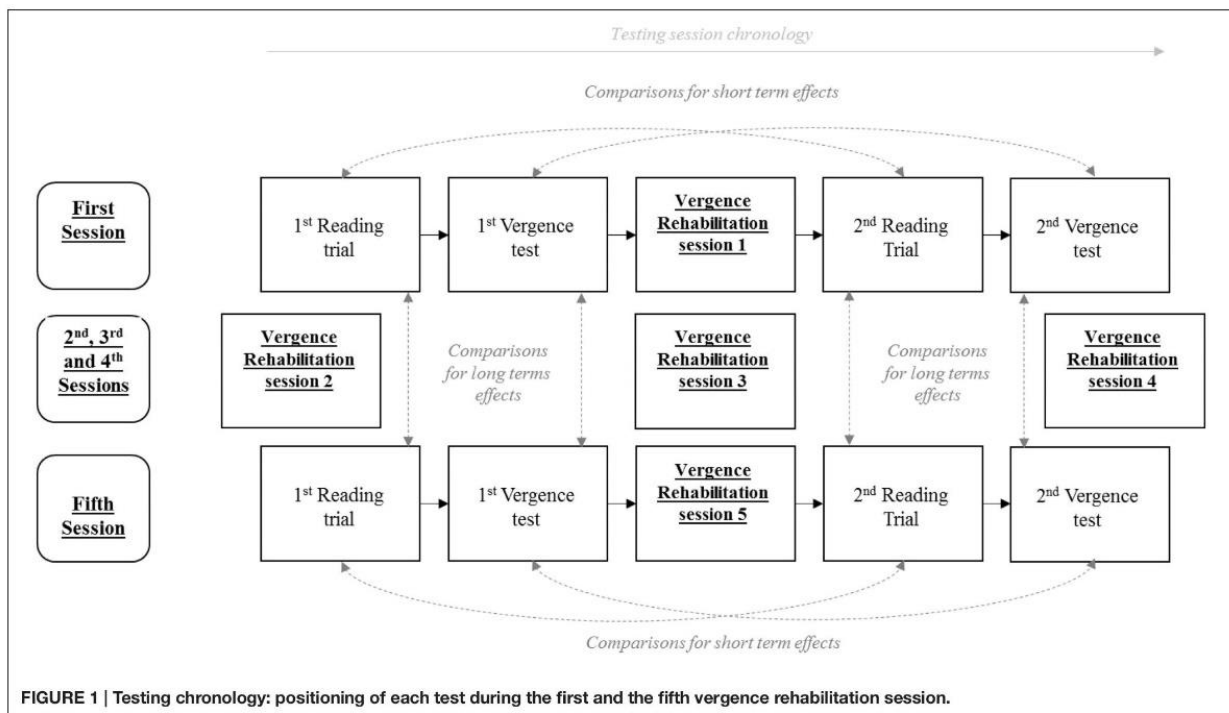


FIGURE 1 | Testing chronology: positioning of each test during the first and the fifth vergence rehabilitation session.

the saccades parameters, in terms of numbers or amplitude, will give us more information on the behavior of the subjects during a silent reading task.

Vergence Test

The REMOBI device was run with the vergence test. A fixation LED appeared first to a location of 40 cm during 2000 ms, and was followed by a second target, appeared 1200–1800 ms after the fixation one and randomly located further or closer from the fixation LED, respectively at 150 or 20 cm, during 2000 ms. Each vergence test contained 40 trials, 20 for convergence movements and 20 for divergence movements (see **Figure 2**).

Vergence Rehabilitation Protocol

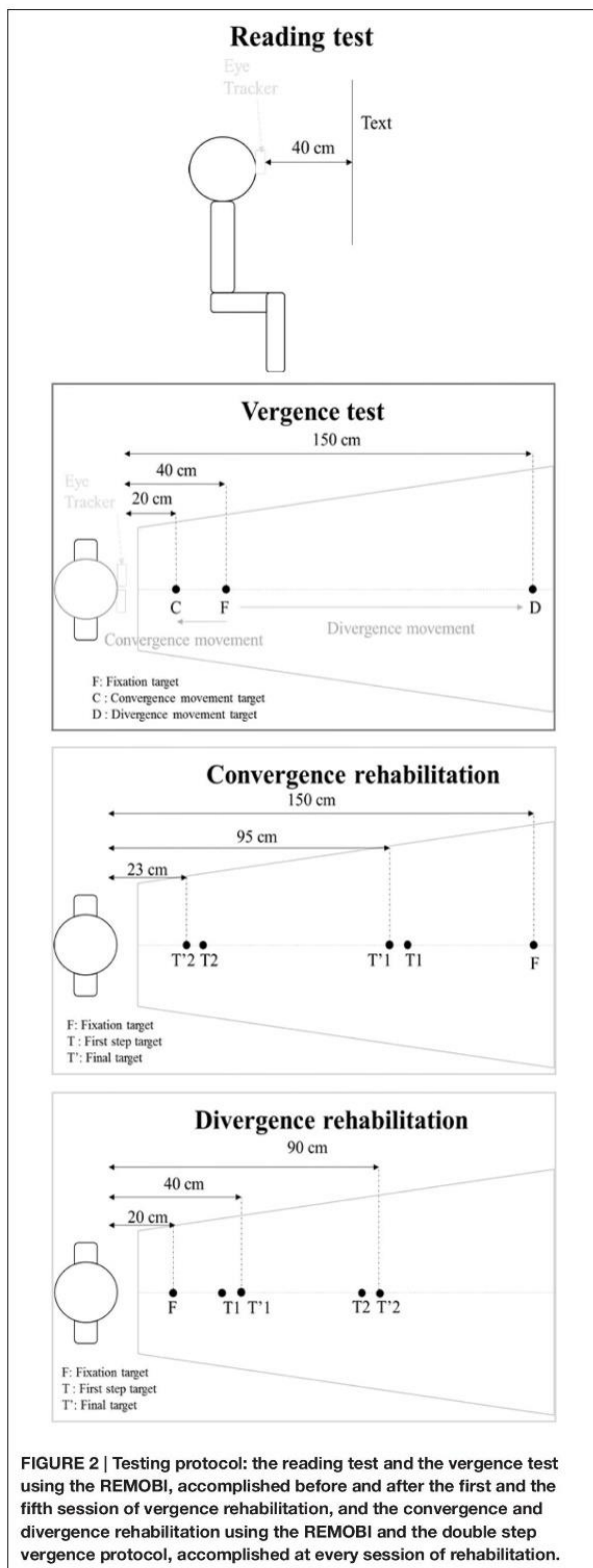
Subjects performed 5 weekly sessions of 35 min vergence rehabilitation using the Vergence double-step protocol with a patented REMOBI device (US 8851669); the REMOBI is composed by a trapezoid surface of LEDs and adjacent buzzers.

A double step-paradigm was used in the convergence and the divergence rehabilitation trials: a fixation target appeared first to a location (150 cm for convergence trials, 20 cm for divergence trials) during 1600 ms, and was immediately followed by a second target (randomly located at 99 or 26 cm for convergence trials and 34 or 57 cm for divergence trials) during 200 ms and a final target (respectively located at 95 or 23 cm for the convergence trials and 40 or 90 cm for the divergence trials) during 1300 ms (see **Figure 2**, for further details see Kapoula et al., 2016). The vergence double-step protocol was designed to expose the visuo-motor system to an error that

cannot be corrected online and leads to adaptive readjustment of the gain of the motor control. Takagi et al. (2001) were the first to show its validity for vergence as well in healthy subjects.

Eye Movements Recording

Eye movements were recorded during the vergence tests and during the reading trials, four times: at the beginning and the end of the first and the fifth session (see **Figure 1**). These data are different from those of the previous study of Kapoula et al. (2016) which presented results before a week and a month after vergence rehabilitation; the present study focuses on the recordings of vergence and reading during the first and the fifth vergence training session. The subject was asked whether to read the text or to fixate the LEDs, and eye movements were recorded binocularly with a video-oculography EyeSeeCam system (University of Munich Hospital, Clinical Neuroscience, Munich, Germany, see <http://eyesecam.com/>). The sampling rate of the EyeSeeCam system was 222 Hz and the optimal spatial resolution was approximately 0.01° . At the beginning of the reading task, a 5 points calibration sequence was run using a matrices of laser dots: a central dot and four peripheral dots displayed at 8.5° rightward, leftward, downward and upward. Subjects fixated each dot one by one for four times, and total calibration task lasted less than 30 s. At the beginning of the vergence tests, a further calibration task was performed using the REMOBI to elicit 16 interleaved leftward and rightward saccades to LEDs located at 10° and 20° from the midsagittal plan, at a distance of 1.5 m from subjects' eyes.



Eye Movement Analysis

Calibration factors for each eye were extracted from the saccades recorded in the calibration task. From the individual calibrated eye position signal we derived the horizontal conjugate signal by calculating the mean of the two horizontal eye positions, i.e., $(\text{left eye} + \text{right eye})/2$, and the horizontal disconjugate signal by calculating the difference position between both eyes, i.e., $\text{left eye} - \text{right eye}$. The velocity of the horizontal conjugate and disconjugate signals were computed using a symmetrical two-point differentiator combined to low-pass filtering with a Gaussian Finite Impulse Response (FIR) filter (cut-off frequency 33 Hz).

Horizontal eye movements were defined using the velocity of the signal, respectively conjugate velocity for saccades and disconjugate velocity for vergence. The onset, or offset, were marked as the time when velocity signal exceeded, or dropped respectively below 10% of the maximum velocity. Similar criteria have been used in several other studies (Bucci et al., 2001; Yang and Kapoula, 2003; Vernet and Kapoula, 2009): i for the onset and p for the offset of each eye movement (see Figures 3A,B). The automatic position of the markers was carefully verified by visual inspection of the individual eye movement traces. From these markers, we measured the amplitude of the movement (between p and i). Some eye movements were rejected from the analysis.

Analysis of the Reading Test

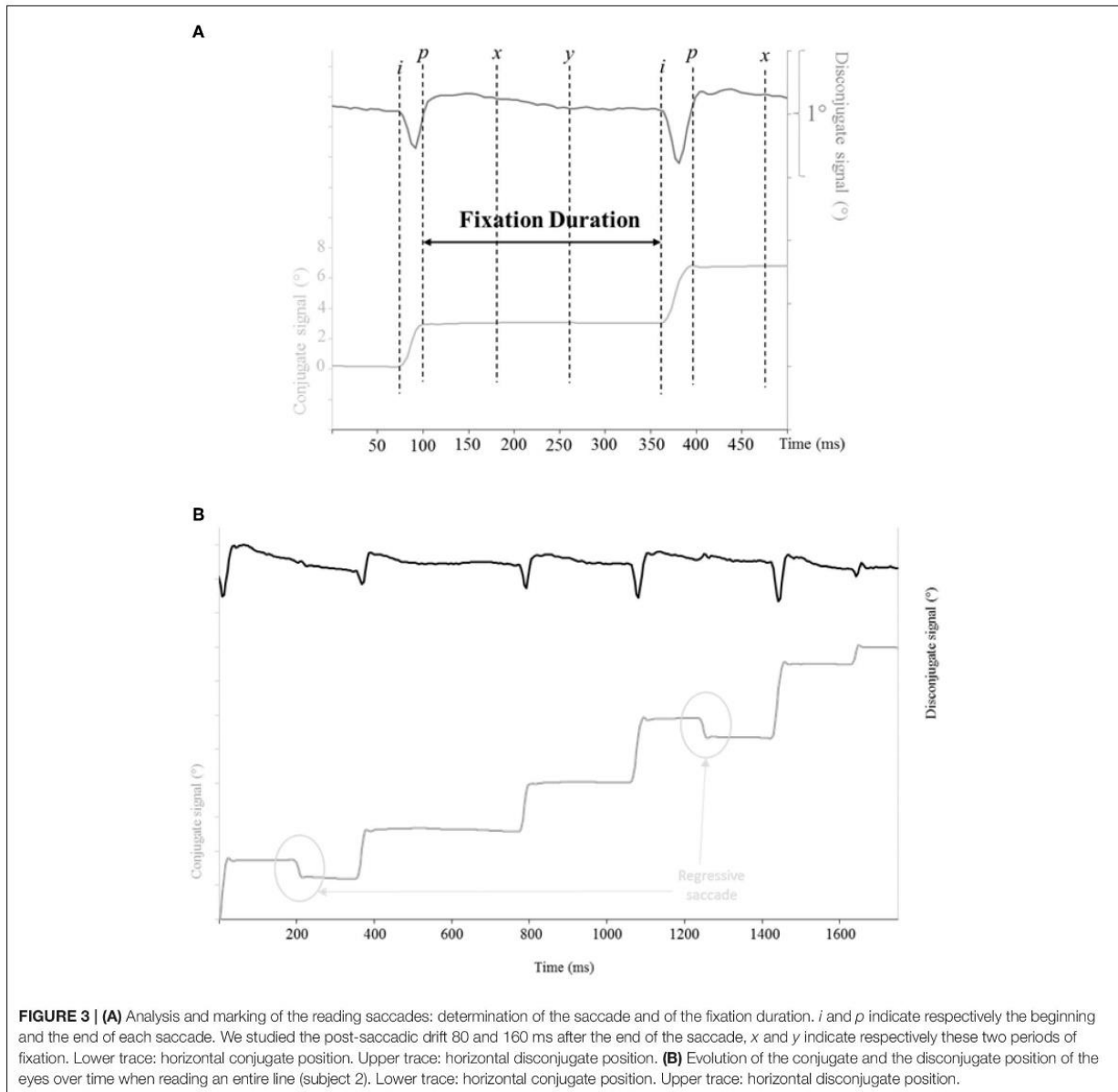
A few markers were added from the saccades analysis, x and y respectively 80 and 160 ms after p , as post-saccadic fixation marks (see Figure 3A).

From these markers, we measured the amplitude of the post-saccadic drift during the first 80 ms (between x and p) and the first 160 ms (between y and p) of fixation, using the conjugate signal. We then calculated the disconjugacy (change of disparity) during the saccades (between p and i), during the first 80 ms of the post-saccadic drift (between x and p) and during the first 160 ms of the post-saccadic drift (between y and p), using the disconjugate signal. We also calculated the fixation duration (between p and the i for the next saccade, see Figure 3A).

For eight subjects, 80–90% of trials were used for statistical analysis, 10–20% were rejected due to blinks or partial lost signal during the recording; for one subject in one reading trial, 40% of the saccades were rejected due to a loss of signal for one eye during the recording.

Analysis of the Vergence Test

The main parameter of the vergence analysis is the amplitude of the movement which was expressed as the gain, i.e., objective amplitude of the vergence response/requirement and its variability (see Figure 4). Pupillary distance was used to calculate the exact vergence requirement for each subject individually. It is important to note that most of the subjects diagnosed with vergence disorders showed strong abnormalities in convergence and/or divergence movements in terms of gain compared to control subjects (see Kapoula et al., 2016). For all subjects 75–100% of convergence and divergence trials were used in the statistical analysis. To be precise, $11.6 \pm 8\%$ were rejected mostly due to blink and loss of signal,



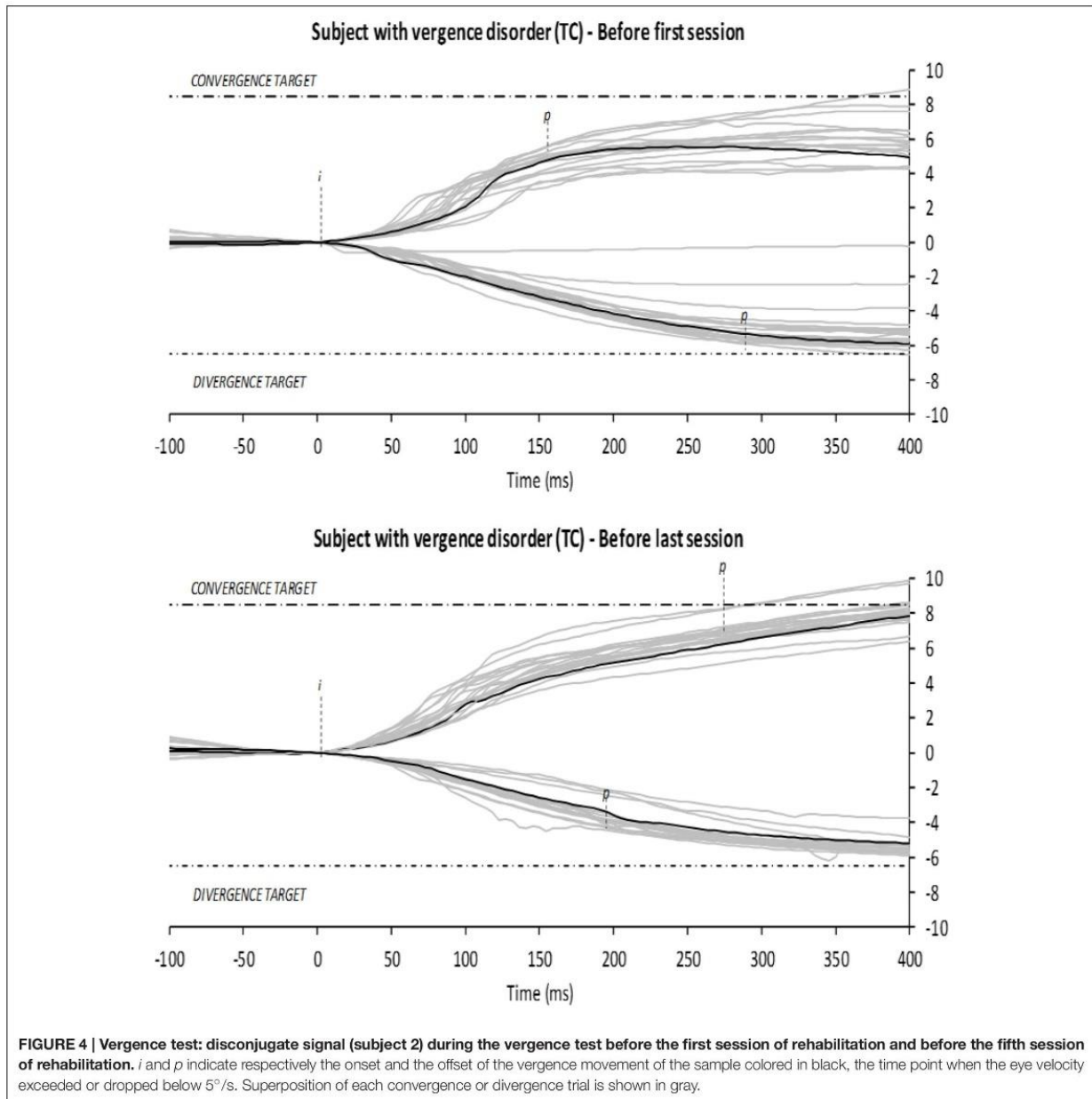
similarly for convergence and divergence, at the group level which is similar to the rejection level from a previous study of overlap vergence in healthy young adults (Lang et al., 2014).

Statistical Analysis

We used the statistic program *Statistica* to perform our analysis. A non-parametric Friedman ANOVA was used as the number of subjects was limited; this analysis was applied on individual measures: as four different trials per subject have been run, we were looking for an effect of the vergence rehabilitation on the

global time of reading, on the binocular coordination of the reading saccades and fixations, and on the temporal parameters of the fixations.

When a significant main effect of the vergence rehabilitation was found, a non-parametric Wilcoxon test was then performed to compare reading trials two by two: (1) to establish the short term effects of vergence training, we compare the first with the last reading trial or vergence test run within the same session, and this for each of the two session, before and after vergence training; (2) to establish the long term effects of rehabilitation, we compared the first reading trial of the



vergence test of the session prior to rehabilitation with the first reading trial of vergence test of the session after the complete rehabilitation program was achieved, similarly we compared the last reading trial of the session prior to rehabilitation with the last reading trial of the session after the achievement of rehabilitation (see **Figure 1**). To double check the validity of the Friedman ANOVA results, we also performed a two-way ANOVA after data ranking, considering together the short term and the long term effects.

As the saccade disconjugacy can be corrected by the post-saccadic drift disconjugacy (see Vernet and Kapoula, 2009), we also searched for a possible correlation between the amplitude of the saccade disconjugacy and the amplitude of the post-saccadic drift disconjugacy. We used a Spearman correlation analysis on individual data and on the entire data set for each reading test.

As the global time of reading could be influenced by several temporal and motor parameters, we performed a multiple

TABLE 2 | Mean values and SD for the gain and the variability in the vergence tests.

	First test first session	Last test first session	First test fifth session	Last test fifth session
CONVERGENCE				
Mean gain value	0.68* (± 0.2)	0.66* (± 0.2)	0.92* (± 0.2)	0.94* (± 0.17)
Mean variability value	37 (± 23)	29* (± 22)	14 (± 6)	13* (± 6)
DIVERGENCE				
Mean gain value	0.57 (± 0.22)	0.69* (± 0.13)	0.75+ (± 0.11)	0.81+* (± 0.14)
Mean variability value	36* (± 30)	17* (± 10)	14* (± 7)	13* (± 11)

*Significant long term effect (between beginning of the 2 sessions or between end of the 2 sessions).

+Significant short term effect (between the first and the second attempt of one session).

regression analysis to know which parameter between fixation duration and saccade disconjugacy could predict the best the global reading improvement.

RESULTS

Effects of Vergence Rehabilitation on Clinical Tests

Vergence rehabilitation led to significant improvements of both orthoptic findings and CISS scores for the symptomatology (see **Table 1**). Statistically significant differences were found for the convergence at far distance and CISS Scores, the means being 13 ± 5 Prism Diopter (PD) vs. 25 ± 10 PD ($Z = 2.37$, $p < 0.02$) and 27.6 ± 7.1 vs. 15.3 ± 7.8 ($Z = 2.67$, $p < 0.01$) before and after vergence rehabilitation respectively. The mean value of the Near Point of Convergence (NPC) decreased and the mean value of the near convergence at near increased after the vergence rehabilitation, but these positive changes did not reach statistical significance ($p > 0.05$).

Vergence Tests

Mean values and standard deviations for the group of nine subjects are shown on **Table 2**, for each of the following parameters: gain and variability for the convergence and divergence movements.

Short Terms Effects

For the first session, no significant difference has been found ($p > 0.05$), neither for convergence or divergent movements. Yet, a significant difference has been found ($Z = 2.43$, $p = 0.015$) in terms of gain in divergence movements between the two tests for the final session (0.75 ± 0.11 vs. 0.81 ± 0.14), run after the complete program of vergence rehabilitation.

Long Terms Effects

Convergence movements

Significant increase of the gain has been found, between the first vergence test run before rehabilitation and the first vergence test run in the final session after the rehabilitation (0.68 ± 0.20 vs. 0.92 ± 0.20 , $Z = 2.31$, $p = 0.021$); also between the last vergence

test run after the first session of rehabilitation and the last vergence test run after the fifth session of vergence rehabilitation (0.66 ± 0.20 vs. 0.94 ± 0.17 , $Z = 2.67$, $p = 0.008$). Significantly lower variability in the movements' amplitude has been found when comparing the last vergence test run after the first session of vergence rehabilitation with the last vergence test run after the final, fifth session of vergence rehabilitation (29 ± 22 vs. 13 ± 6 , $Z = 2.07$, $p = 0.038$).

Divergence movements

Significant increase of the gain has been found when comparing the last vergence test run after the first session of vergence the rehabilitation and the last vergence test run before the final, fifth session of rehabilitation (0.69 ± 0.13 vs. 0.81 ± 0.14 , $Z = 2.19$, $p = 0.028$). Significantly lower variability in the movements' amplitude has been found when comparing the vergence test run before the first session of vergence rehabilitation and the first vergence test run during the final, fifth session of vergence rehabilitation (36 ± 30 vs. 14 ± 7 , $Z = 2.07$, $p = 0.038$); similarly when comparing the last vergence test run in the first and in the fifth session of vergence rehabilitation (17 ± 10 vs. 13 ± 11 , $Z = 2.31$, $p = 0.021$).

We compared the evolution of both CISS score and gain in convergence and divergence before and after the vergence rehabilitation. The decrease of the CISS score after the vergence rehabilitation was not significantly correlated with the increase of the vergence gain ($p > 0.05$, using a Spearman correlation analysis; see **Figure 5**).

Reading Tests

Reading Saccades Parameters

Numbers, amplitude in degrees and standard deviation of progressive and regressive saccades are shown on **Figure 6**. Overall progressive saccades were of a higher amplitude than the regressive saccades ($2.77 \pm 0.05^\circ$ vs. $1.85 \pm 0.11^\circ$). Regressive saccades (see **Figure 3B**) were less frequent than progressive saccades and represented 16.11% of the total amount of saccades accomplished by the subjects. Mean values for the group of nine subjects in each reading trial concerning saccades amplitude, duration of the fixations, disconjugacy of the saccades and post-saccadic disconjugate and conjugate signals are shown on **Table 3A** for progressive saccades and on **Table 3B** for regressive saccades. Details about saccade disconjugacy results are shown on **Figure 7** for progressive and regressive saccades.

For the majority of the subjects (between 67 and 89%, depending on the reading trial), the amplitude of the saccade disconjugacy was negatively and significantly ($p < 0.05$) correlated with the amplitude of the post-saccadic disconjugacy drift, measured at 80 or 160 ms after the end of the saccade; thus the post-saccadic drift may act to reduce the misalignment of the eyes at the end of the saccade (see Vernet and Kapoula, 2009). The Spearman r_s correlation coefficient values are shown on **Table 4** for each subject and for each reading trial of the first and the fifth session, significant values ($p < 0.05$) are written in bold type. When studying the same parameters (80 ms) for all the subjects together, a significant correlation is observed for each reading trial ($p < 0.001$, see **Figure 8**) which confirms the individual data.

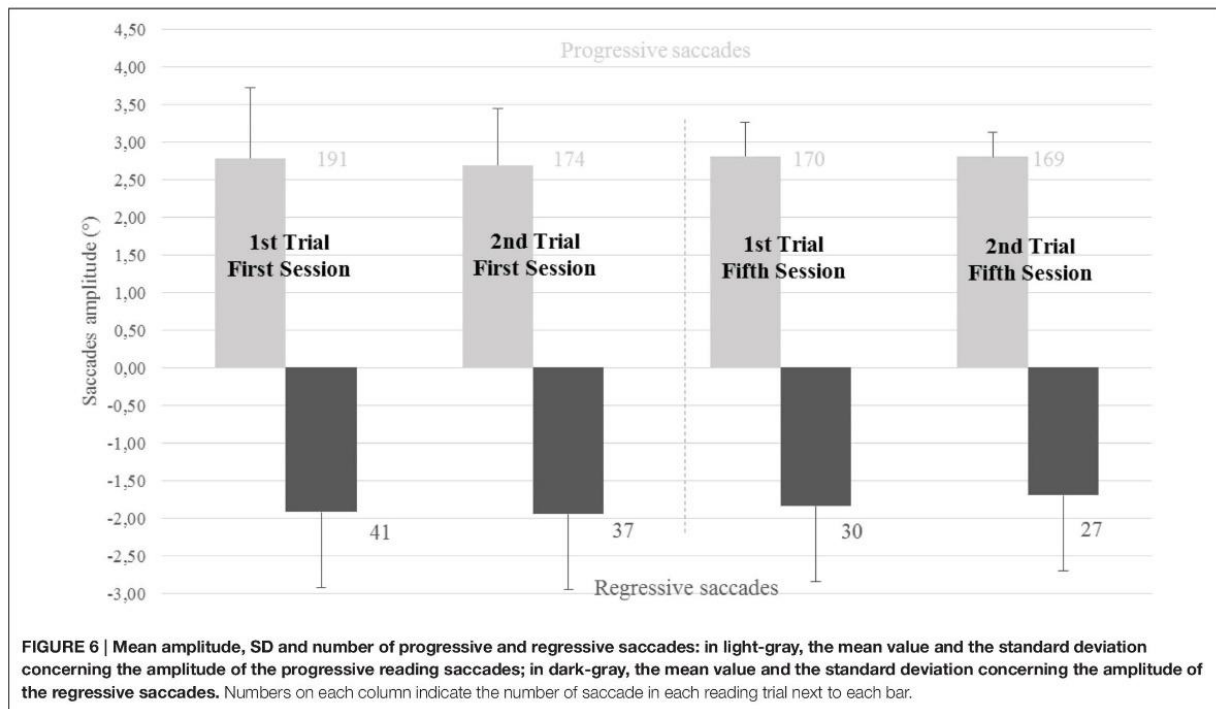
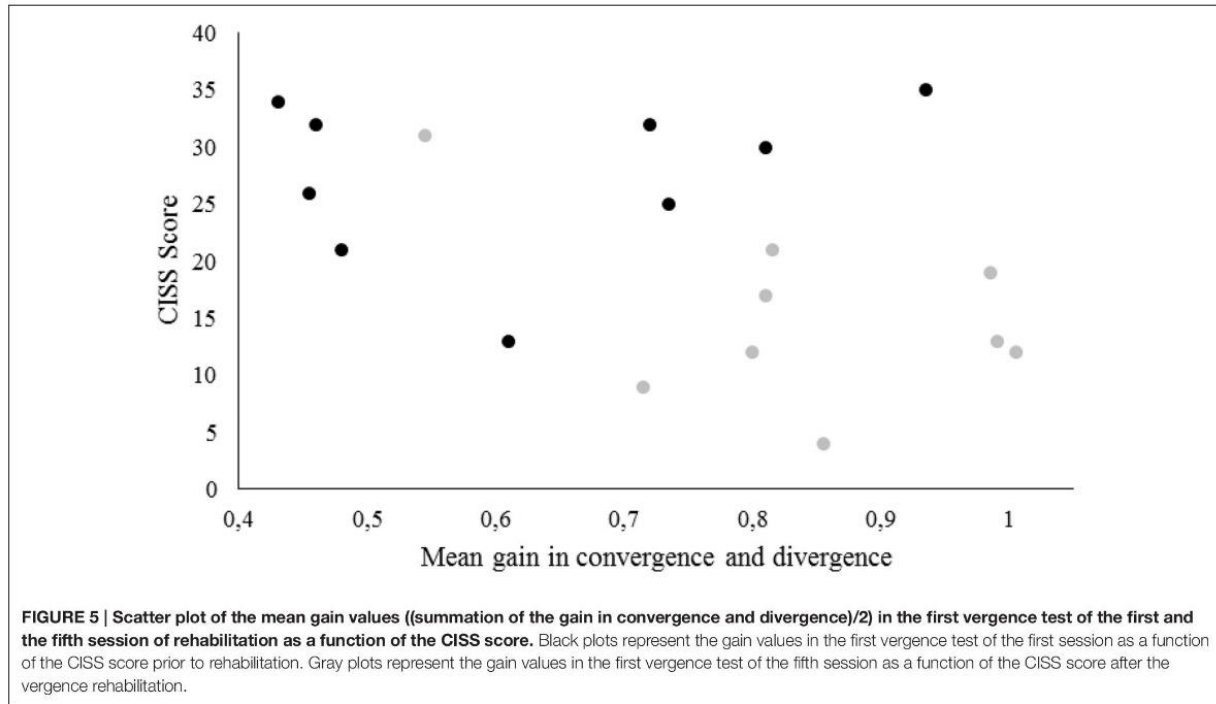


TABLE 3 | Mean values and SD for the progressive and the regressive reading saccades parameters, and for the global reading time.

	First trial first session	Last trial first session	First trial fifth session	Last trial fifth session
(A)—PROGRESSIVE READING SACCADES				
Saccades amplitude (°)	2.78 (± 0.93)	2.69 (± 0.75)	2.81 (± 0.45)	2.80 (± 0.33)
Fixation duration (ms)	286.46* (± 59.97)	269.92* (± 51.08)	266.79* (± 56.70)	258.33* (± 55.38)
Disconjugacy of saccades (°)	0.05 (± 0.17)	0.01 (± 0.15)	0.03 (± 0.13)	0.03 (± 0.13)
Disconjugacy of saccades (°) Absolute value	0.21* (± 0.10)	0.19 (± 0.09)	0.15* (± 0.08)	0.16 (± 0.07)
Disconjugate Post-saccadic drift 80 ms (°)	-0.02 (± 0.09)	-0.03 (± 0.07)	-0.02 (± 0.09)	-0.01 (± 0.08)
Disconjugate Post-saccadic drift 80 ms (°) Absolute value	0.12 (± 0.06)	0.11 (± 0.05)	0.09 (± 0.04)	0.10 (± 0.04)
Disconjugate Post-saccadic drift 160 ms (°)	-0.03 (± 0.13)	-0.05 (± 0.10)	-0.05 (± 0.13)	-0.03 (± 0.13)
Disconjugate Post-saccadic drift 160 ms (°) Absolute value	0.15 (± 0.08)	0.13 (± 0.05)	0.14 (± 0.07)	0.14 (± 0.06)
Conjugated Post-saccadic drift 80 ms (°)	-0.09 (± 0.05)	-0.09 (± 0.07)	-0.10 (± 0.06)	-0.11 (± 0.07)
Conjugated Post-saccadic drift 80 ms (°) Absolute value	0.14 (± 0.05)	0.13 (± 0.06)	0.14 (± 0.05)	0.14 (± 0.06)
Conjugated Post-saccadic drift 160 ms (°)	-0.13 (± 0.06)	-0.11 (± 0.08)	-0.13 (± 0.08)	-0.14 (± 0.08)
Conjugated Post-saccadic drift 160 ms (°) Absolute value	0.20 (± 0.07)	0.18 (± 0.07)	0.19 (± 0.07)	0.19 (± 0.07)
(B)—REGRESSIVE READING SACCADES				
Saccades amplitude (°)	-1.92 (± 0.45)	-1.94 (± 0.55)	-1.84 (± 0.38)	-1.69 (± 0.18)
Fixation duration (ms)	243.09 (± 53.31)	231.26 (± 57.03)	234.33 (± 65.51)	241.61 (± 62.93)
Disconjugacy of saccades (°)	0.07 (± 0.10)	0.11 (± 0.12)	0.08 (± 0.07)	0.10 (± 0.09)
Disconjugacy of saccades (°) Absolute value	0.16 (± 0.09)	0.17 (± 0.10)	0.13 (± 0.06)	0.14 (± 0.07)
Disconjugate Post-saccadic drift 80 ms (°)	-0.06 (± 0.08)	-0.03 (± 0.07)	-0.07 (± 0.04)	-0.07 (± 0.09)
Disconjugate Post-saccadic drift 80 ms (°) Absolute value	0.12 (± 0.05)	0.11 (± 0.03)	0.09 (± 0.02)	0.12 (± 0.07)
Disconjugate Post-saccadic drift 160 ms (°)	-0.09 (± 0.10)	-0.03 (± 0.13)	-0.08 (± 0.06)	-0.07 (± 0.07)
Disconjugate Post-saccadic drift 160 ms (°) Absolute value	0.16 (± 0.07)	0.14 (± 0.06)	0.12 (± 0.04)	0.13 (± 0.08)
Conjugated Post-saccadic drift 80 ms (°)	0.14 (± 0.18)	0.06 (± 0.31)	0.10 (± 0.08)	0.11 (± 0.11)
Conjugated Post-saccadic drift 80 ms (°) Absolute value	0.17 (± 0.18)	0.23 (± 0.23)	0.13 (± 0.08)	0.15 (± 0.09)
Conjugated Post-saccadic drift 160 ms (°)	0.17 (± 0.17)	0.02 (± 0.63)	0.10 (± 0.10)	0.13 (± 0.13)
Conjugated Post-saccadic drift 160 ms (°) Absolute value	0.22 (± 0.16)	0.37 (± 0.51)	0.18 (± 0.09)	0.18 (± 0.13)
(C)—GLOBAL READING TIME				
Global reading time (s)	83.11** (± 20.19)	73.44* (± 18.66)	72.00* (± 19.97)	67.00 (± 17.46)

*Significant long term effect (between beginning of the 2 sessions or between end of the 2 sessions).

†Significant short term effect (between the first and the second reading trial of one session).

Short Terms Effects

Progressive reading saccades and fixations

No significant changes were found in terms of saccade amplitudes, fixation durations or conjugate and disconjugate post-saccadic drifts ($p > 0.05$).

Regressive reading saccades and fixations

There was a difference in terms of numbers of regressive saccades between the first and the second reading trial of each session (41 ± 18 vs. 37 ± 14 for the first session, 30 ± 14 vs. 27 ± 15 for the last session). Yet, this reduction was not statistically significant (respectively $Z = 0.89$, $p = 0.37$ and $Z = 1.12$, $p = 0.26$). No significant changes were found in terms of saccade amplitudes, fixation durations or conjugate and disconjugate post-saccadic drifts ($p > 0.05$).

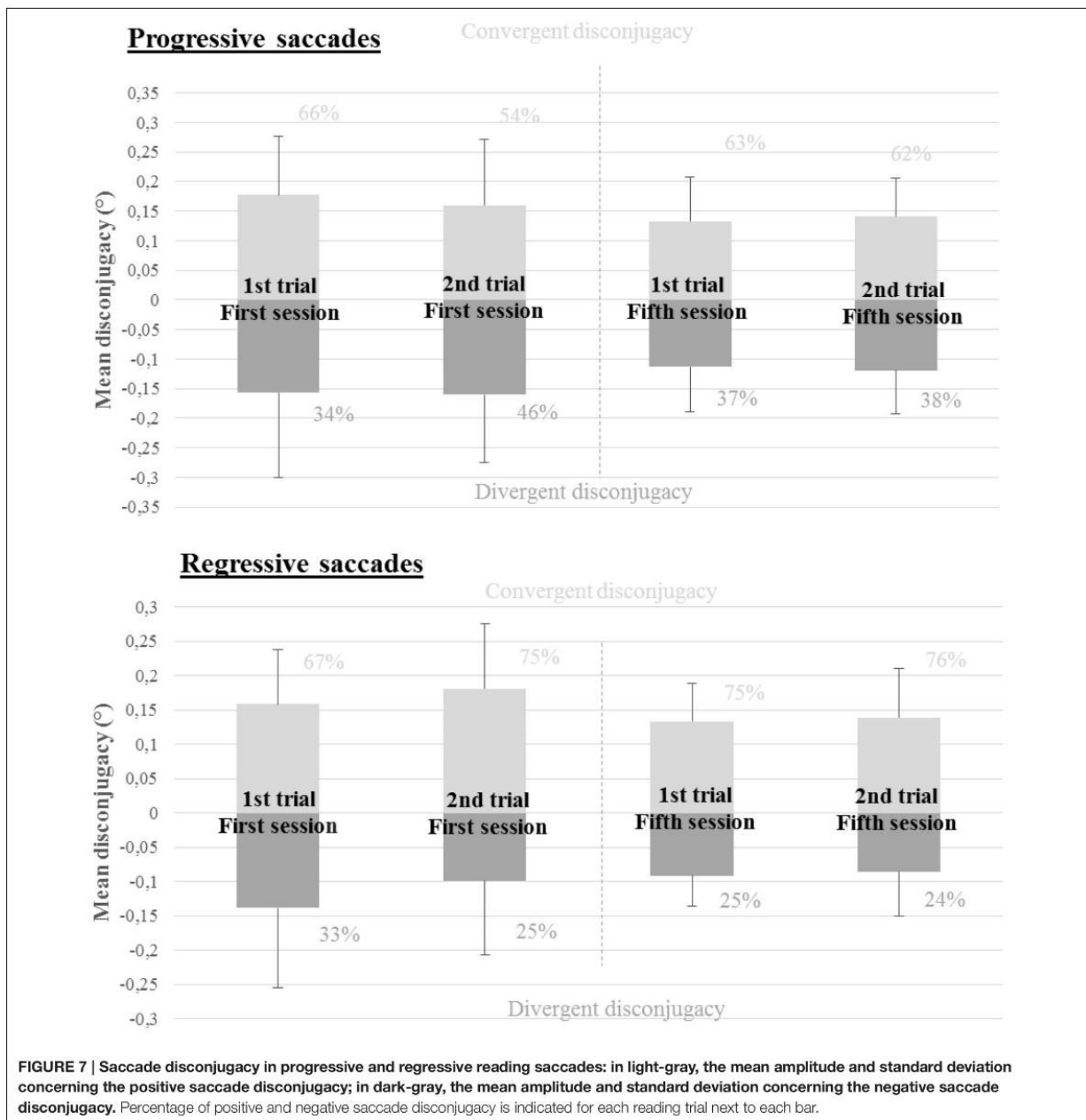
Long Terms Effects

Progressive saccades

The non-parametric Friedman ANOVA test showed a significant effect of the tested conditions on the absolute value of the

disconjugacy of progressive saccades [$X^2_{(9,3)} = 10.47$, $p = 0.015$]. There was a decrease in terms of mean value of the disconjugacy after the vergence rehabilitation. The non-parametric Wilcoxon test showed a significant decrease between the first reading trial of the two sessions ($0.21 \pm 0.10^\circ$ vs. $0.15 \pm 0.08^\circ$, $Z = 2.67$, $p = 0.008$). Additionally, after ranking the data, the two-way ANOVA test confirmed the results below: the main effect for long terms effect of vergence rehabilitation yielded an F ratio of $F_{(1,8)} = 14.23$, $p = 0.0054$.

The non-parametric Friedman ANOVA test showed significant effect of the tested conditions on fixation duration [$X^2_{(9,3)} = 10.20$, $p = 0.017$]. The non-parametric Wilcoxon test showed a significant decrease of the fixation duration between the trials of the two sessions, and this is the case either for the first reading trial (286.46 ± 59.97 ms vs. 266.79 ± 56.70 ms, $Z = 2.67$, $p = 0.008$) and the second reading trial (269.92 ± 51.08 ms vs. 258.33 ± 55.38 ms, $Z = 2.31$, $p = 0.021$), comparing the first and the fifth session of rehabilitation. Additionally, after ranking the data, the two-way ANOVA test confirmed the results below: the main effect for long terms effect of



vergence rehabilitation yielded an F ratio of $F_{(1, 8)} = 30.76$, $p = 0.00054$.

Regressive saccades

when comparing first and fifth rehabilitation sessions, we observed a decrease of the number of regressive saccades both for the first reading trial of the two sessions (41.11 ± 18.29 vs. 30.22 ± 14.18) and for the second reading trial of the two sessions (37 ± 14.74 vs. 27.11 ± 15.49). Comparisons between the first

reading trial of the two sessions showed a significant difference ($Z = 2.25$, $p = 0.024$). After ranking the data, the two-way ANOVA test confirmed the results below with a significant the main effect concerning long terms effects: $F_{(1, 8)} = 12.903$, $p = 0.0071$. Yet, comparison between the last reading trial of the two sessions tended to give a similar result but was not statistically significant ($Z = 1.95$, $p = 0.05$).

No significant changes were found in terms of saccade amplitudes, fixation durations or conjugate and disconjugate

TABLE 4 | Spearman r_s correlation coefficient between the amplitude of the saccade disconjugacy and the post-saccadic disconjugacy drift calculated 80 and 160 ms after the end of the saccade.

Subject	First trial, first session	Second trial, first session	First trial, fifth session	Second trial, fifth session
SPEARMAN r_s CORRELATION COEFFICIENT VALUES (80 ms DRIFT)				
s1	-0.69	-0.57	-0.59	-0.75
s2	-0.49	-0.57	-0.24	-0.59
s3	-0.79	-0.61	-0.44	-0.42
s4	0.1	-0.14	-0.28	-0.17
s5	-0.33	0.02	-0.22	-0.09
s6	-0.23	-0.44	-0.37	-0.24
s7	-0.34	-0.4	-0.38	-0.55
s8	-0.52	-0.32	-0.62	-0.39
s9	-0.44	-0.56	-0.63	-0.68
SPEARMAN r_s CORRELATION COEFFICIENT VALUES (160 ms DRIFT)				
s1	-0.62	-0.57	-0.64	-0.72
s2	-0.28	-0.37	-0.11	-0.53
s3	-0.77	-0.61	-0.34	-0.37
s4	0.07	-0.15	-0.27	-0.16
s5	-0.29	0.07	-0.17	-0.09
s6	-0.25	-0.26	-0.33	-0.22
s7	-0.36	-0.39	-0.28	-0.56
s8	-0.39	-0.17	-0.47	-0.28
s9	-0.28	-0.55	-0.49	-0.64

Significant values ($p < 0.05$) are written in bold type.

post-saccadic drifts concerning long term effects of rehabilitation ($p > 0.05$).

Global Reading Time

Mean values and standard deviations for the group of nine subject and for each testing condition are shown on **Table 3C**. The non-parametric Friedman ANOVA test showed an effect of the condition on the global time of reading of the text *l'Alouette* [$X^2_{(9, 3)} = 14.97, p = 0.0019$].

Short Terms Effects

Comparison between the first (83.11 ± 20.19 s) and the second reading trial (73.44 ± 18.66 s) of the first session showed a significant decrease in terms of time for the reading task *l'Alouette* ($Z = 2.25, p = 0.024$). After ranking the data, the two-way ANOVA test confirmed the results below: the main effect for short terms effect of vergence rehabilitation yielded an F ratio of $F_{(1,8)} = 12, p = 0.0085$. Yet, no significant decrease was found for the two reading trials of the last session ($72.0 \text{ s} \pm 19.97$ vs. $67.0 \text{ s} \pm 17.46$), run after the vergence rehabilitation ($Z = 1.54, p = 0.12$).

Long Terms Effects

Comparison between the first reading trial (83.11 ± 20.19 s) of the first session and the first reading trial of the fifth session (72 ± 19.97 s) showed a significant decrease of time for the reading task *l'Alouette* ($Z = 2.67, p = 0.0076$). After ranking the data, the two-way ANOVA test confirmed the results below:

the main effect for long terms effect of vergence rehabilitation yielded an F ratio of $F_{(1,8)} = 21.33, p = 0.0017$. Yet, no significant differences were found between the second reading trial of the first and the fifth session (73.44 ± 18.66 s vs. 67.0 ± 17.46 s; $Z = 1.54, p = 0.12$).

A multiple linear regression analysis was used to develop a model for predicting the global reading time value of the subjects from their individual absolute mean value of saccade disconjugacy and their fixation duration mean value. Basic descriptive statistics and regression coefficients are shown in **Table 5**. As expected, the fixation duration appears to be a better predictor of the global reading time value, as they are significantly and positively correlated in the first trial of the first session and in both trials of the fifth session ($p < 0.02$): the shorter the fixation, the faster the reading task was accomplished. This was not the case concerning saccade disconjugacy ($p > 0.05$, see **Table 5**).

To summarize the main results, mean values of difference between conditions and associated standard deviation concerning the main reading parameters that significantly change are shown on **Table 6**.

Control Group

An additional reading test was run two times on three control students. The results shown a decrease of global reading time by 2 s when tested twice) after a 35 min interval (77 ± 5 s for the first trial vs. 75 ± 8 s for the second trial, using an interval similar to that used in the main study).

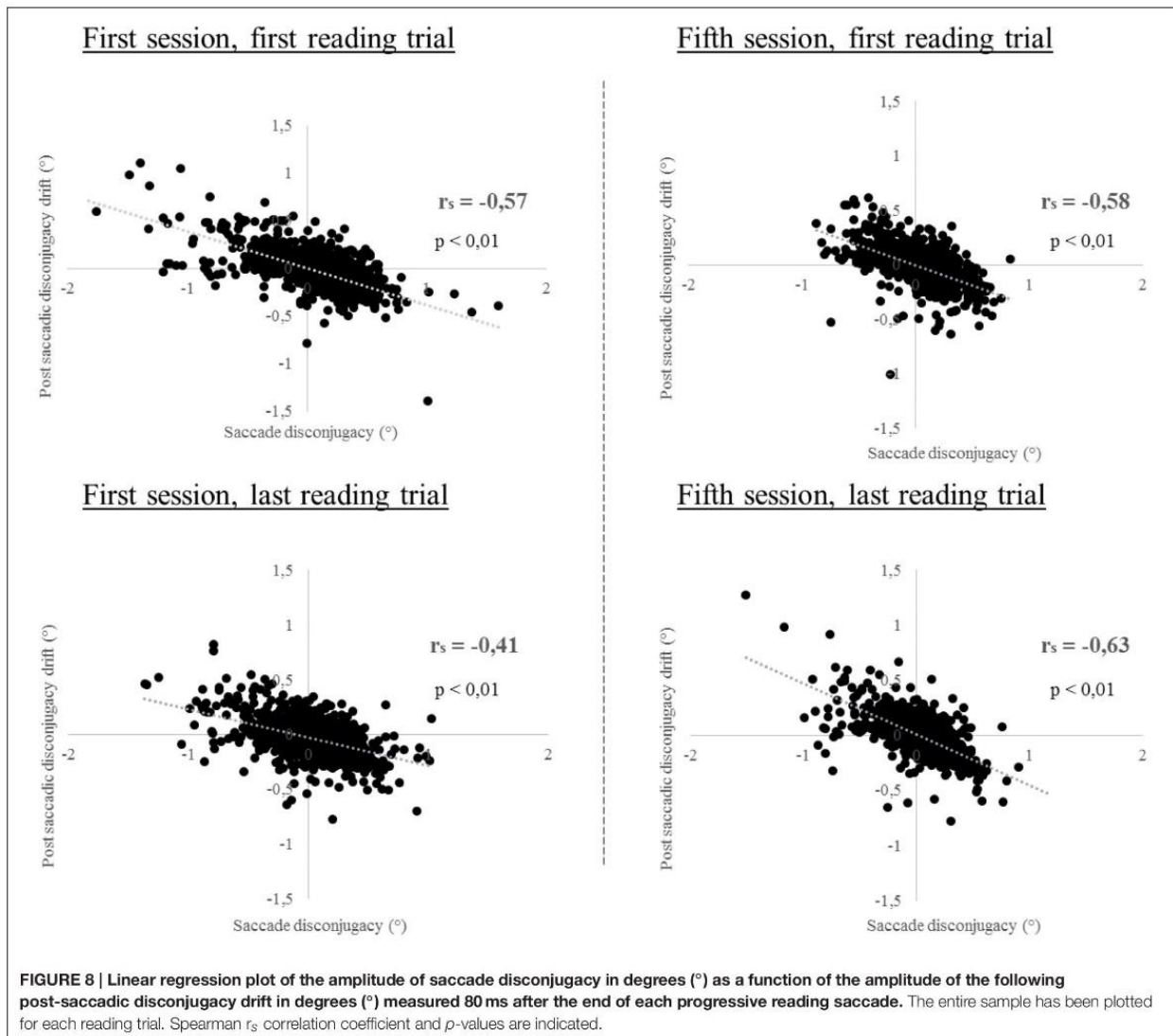
DISCUSSION

Summary of Results

The study shows a few short term effects and mostly long term effects of vergence rehabilitation. The vergence double-step protocol improved vergence accuracy and reduced the variability, tested in a regular single step vergence test. This behavior indicates a central oculomotor neuroplasticity, similarly to that described in numerous studies for saccade adaptation (see Alahyane and Pélisson, 2005) and for vergence (Takagi et al., 2001; Kapoula et al., 2016). Our present study shows lasting beneficial effects, i.e., in accuracy and concerning variability, between first and last session. Moreover values became similar or even better to those from control subjects and provide evidence for a real rehabilitation method.

More precisely, significant changes induced by a single session of vergence rehabilitation concern two parameters: (1) the global reading time, with a significant decrease between the two reading trials run in the first session of vergence rehabilitation; (2) the gain in divergence movement that increased for the second trial compared to the first run in the final session of vergence rehabilitation.

In addition, the complete vergence rehabilitation led to several significant findings: (1) the symptomatology decreased; (2) convergence at far distance measured by orthoptics tests increased; (3) the gain of convergence and divergence movements measured with oculography increased and the



variability of the movements' amplitude decreased; (4) the global reading time decreased between the sessions; (5) the duration of the fixations during reading decreased; (6) the absolute value of the disjuncy of reading saccades decreased; (7) the numbers of regressive reading saccades decreased.

Short Term Effects: Increase of Reading Speed

Short term effects of vergence rehabilitation were rather weak: the vergence tested before and after 35 min of vergence training only showed a significant increase of the gain in divergence movement in the fifth session (the gain increased by 0.06 ± 0.06). However, there was a tendency for reducing the variability of the convergence and the divergence response, particularly during the first session (respectively reduced by $8 \pm 26\%$ and $19 \pm 32\%$). Additionally, there is a significant decrease of the

global reading time, which reduced by about 10 s for the first session of vergence rehabilitation, and that was the case only for the first session. Similar decrease was visible in the last session, but to a lesser amount (5 s only) and the change did not reach statistical significance. It is therefore interesting to investigate whether how reading speed increased, as it could be attributable to a simple training effect. However, the additional reading test on control students showed a decrease of reading time by 2 s when tested twice) after a 35 min interval (77 ± 5 s for the first trial vs. 75 ± 8 s for the second trial), showing a potential limited training effect comparing with the decrease of the main study. Additionally, the parameters of the saccades for both progressive and regressive, or fixations duration, did not show statistical short term significance modulation in the first and the fifth session. Even though, the value of fixation durations and of saccades disjuncy modulated more within

TABLE 5 | Results of the Multiple Linear Regression Analysis (MLRA), as a model to predict the global time of reading from the mean values of the fixation duration with the absolute mean values of saccade disconjugacy.

Chronology	Variables	B	SE B	β	SE β	p
First trial, first session	MLRA	$R^2 = 0.679, F_{(2, 6)} = 6.373, p = 0.033^*$				
	Duration	0.28	0.08	0.83	0.24	0.0129*
	Disconjugacy	3.81	47.12	0.02	0.24	0.94
Last trial, first session	MLRA	$R^2 = 0.457, F_{(2, 6)} = 2.530, p = 0.159$				
	Dur.	0.25	0.11	0.69	0.31	0.0705
	Disconj.	7.41	58.92	0.04	0.31	0.90
First trial, fifth session	MLRA	$R^2 = 0.731, F_{(2, 6)} = 8.147, p = 0.019^*$				
	Dur.	0.25	0.07	0.85	0.22	0.0081**
	Disconj.	8.00	48.30	0.04	0.22	0.87
Last trial, fifth session	MLRA	$R^2 = 0.692, F_{(2, 6)} = 6.742, p = 0.029^*$				
	Dur.	0.27	0.07	0.85	0.23	0.0107*
	Disconj.	-30.12	61.38	-0.11	0.23	0.64

Significance is indicated with an asterisk for $p < 0.05$ (*) or twice for $p < 0.01$.

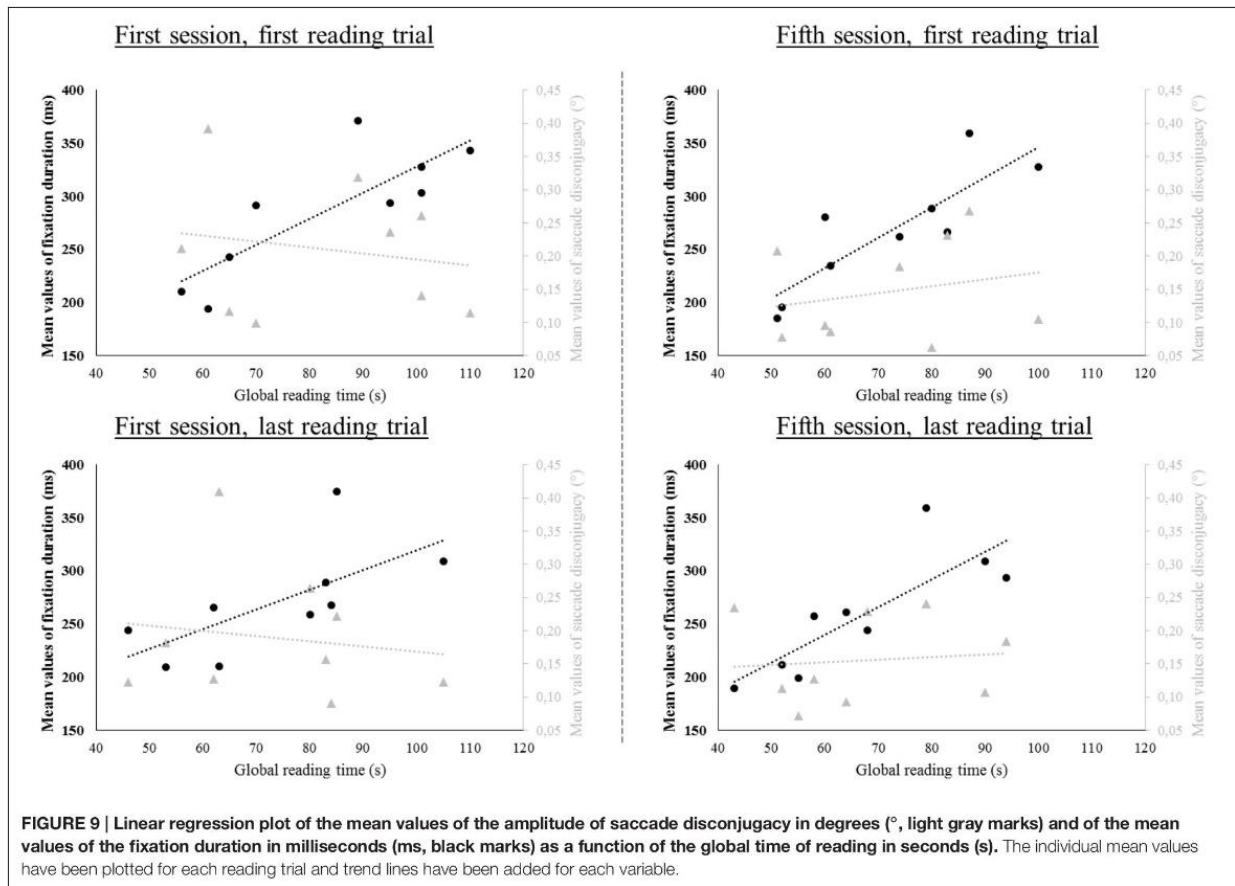
TABLE 6 | Mean values and SD of the difference between the conditions concerning long term and short term effects.

		Short term effect (First session)	Short term effect (Last session)	Long term effect (First trials)	Long term effect (Last trials)
Global Time of reading (s)	Mean SD	-9.67 (± 9.54)	-5.00 (± 7.55)	-11.11 (± 9.94)	-6.44 (± 11.23)
Fixation duration (ms)	Mean SD	-16.54 (± 31.98)	-8.46 (± 21.38)	-19.67 (± 17.59)	-11.60 (± 11.01)
Disconjugacy of saccades ($^\circ$, absolute value)	Mean SD	-0.02 (± 0.06)	0.01 (± 0.03)	-0.06 (± 0.06)	-0.03 (± 0.07)
Numbers of regressive saccades	Mean SD	-4.11 (± 13.21)	-3.11 (± 11.58)	-10.89 (± 11.68)	-9.89 (± 12.94)

the first session than within the last session, after the complete vergence rehabilitation. Overall, one could summarize that, weak short term modulation of the vergence properties corresponds to weak modulations of properties of saccades and fixations during the reading task. The significant decrease of the global reading time within the session is the only benefit and could be attributable to vergence exercising. Consequently, we argue that in parallel with a training effect, a small fraction of the reduction of reading time is due to improvement of saccade binocular coordination leading to shorter fixation duration: the subjects improved their reading speed, possibly due to a combination of reducing their intra-saccadic disconjugacy and their fixation duration (discussed below for long term effects). The fact that short term modulations were present only for the first session sheds light on the nature of vergence disorders. In other words, short term effects appear only when the vergence system is not yet completely rehabilitated. After the four sessions of rehabilitation, the vergence system was rather stabilized with no changes occurring further within the fifth session. The important modulations of vergence rehabilitation comparing the first and the fifth session were in terms of long term effect and occurred after the entire 5 session program of rehabilitation was completed, and are discussed below.

Long Term Effects: Decrease of the Saccade Disconjugacy

In the present study, after a 5 session vergence rehabilitation using a research based method, a number of positive evolutions has been shown: subjectively, symptoms significantly dropped down, associated with increase of the gain of convergence and divergence movements (respectively increased by 0.24 ± 0.25 and 0.18 ± 0.24 when comparing the beginning of each session, see **Figure 5**) but also their regularity (respectively decreased by $23 \pm 25\%$ and $22 \pm 30\%$), and increased vergence capacities measured with a prism bar. The significant decrease of the CISS score after the vergence rehabilitation could represent at least partially effects of care taking and is not significantly correlated with the increase of the vergence gain (see **Figure 5**). However, the limited number of subjects call for further research with a larger sample concerning this correlation. The study shows the clinical validity of the REMOBI and the efficiency of the rehabilitation with only 5 sessions of 35 min each, i.e., a total amount of 2200 vergence movements. These results have been presented more extensively and discussed in another study (Kapoula et al., 2016). Here we focus on the effects of vergence rehabilitation on saccade disconjugacy, which is an indicator of the quality of the coordination of saccades. Optimal coordination of saccades implies that both eyes fixate properly the same letter which



enables single binocular vision, facilitating subsequent processing of reading. At a theoretical level, it has been proposed that perfect binocular coordination of the saccades required during reading is achieved by learning and neuroplasticity (Bucci et al., 2008; Vernet et al., 2008).

It has been hypothesized that this neuroplasticity involves a capacity to program an appropriate small and fast vergence command that occurs rapidly within the saccade. This vergence command will help to reduce the primary saccade disconjucy which would result from the asymmetry of innervational circuits and peripheral muscle of the abducting adducting circuits (Bucci and Kapoula, 2006). Given that the gain of the vergence along the medial plan increased in the present study, we could infer that the intra-saccadic vergence needed to make the saccade more equal was also improved. Our observations of reduced saccade disconjucy after the vergence rehabilitation provide convincing evidence for such hypothetical mechanism. The present study confirms such neural plasticity in young adults, and in only 5 sessions of rehabilitation. Nevertheless, the limited number of subjects and their variability concerning saccade disconjucy when reading call for further research involving a larger sample of subjects showing vergence disorders. Thus, a possible classification using the gains in convergence and

divergence recorded with video-oculography could be helpful to understand the impact of such disorders on the coordination of reading saccades and to build an efficient rehabilitation program adapted to each subgroup. Next, we will discuss the effects on reading speed.

Reduction of Fixation Duration

The major result here is the decrease of the fixation durations. This effect results from several hypothetically parallel processes improved after vergence rehabilitation. Several studies showed that fixation duration in reading is influenced by linguistic factors like the frequency of the fixated word, the predictability of the fixated word or its semantic relation with the prior other words (Rayner, 1998; Rayner et al., 2006). However, the *Alouette* test was firstly designed to detect dyslexia in children, with several non-common words in sentences that do not have any meaning. Thus, semantic relation between words are not possible, and word predictability or memorization are not facilitated, unlike with common texts. This test is one of the most reliable tests to evaluate reading performance in France and is widely used for diagnosis and follow up of dyslexic children (Valdois et al., 2003; Lobier et al., 2012). The students participating in this study were not dyslexic, yet it is important that the test

used for reading should reliably evaluate reading performance (Sprenger-Charolles et al., 2009). We believe that we found similar results to the study of Wilkins et al. (1996) that shows a tight correlation in fixation duration between the first and second reading trials in the first and the last session, or even across sessions. Yet, even if this indicates reliable measure of reading, fixation duration is found to be slightly modulated by vergence rehabilitation. Even if a small training effect can appear with repetition, we argue that shorter fixation durations are partially due to motor improvement, e.g., in binocular coordination of saccades. After de vergence rehabilitation, we can see on **Figure 9** an interesting inversion of tendency suggesting that when the mean values of saccade disconjugacy were lower, the global reading time became shorter, and that was not the case prior to rehabilitation. Even if the regression analysis did not show its significant impact, one could argue that a part of the reduction of fixation duration comes from a better coordination of the reading saccades. However, further studies are needed to consolidate such interpretation. To process visual information readily, fixation should be relatively stable with the eyes aligned to the same letter. Identification of a fixated word is almost an automatic process (Rayner, 1998). The important thing is that it is certain that words were recognized automatically as each word was fixated by the eyes. At least, the only parameters that changed were the fixation duration and the amplitude of the saccade disconjugacy, confirming that the amplitude of the saccades and the number of progressive saccades remained similar. Given that there was no statistical difference between reading trials in post-saccadic drifts but only in the absolute value of saccade disconjugacy, vision could be clear and single from the beginning of the fixation, i.e., from the offset of the saccade. There is early evidence that visual processing (Vernet and Kapoula, 2009) starts from the beginning of the fixation (e.g., first 48 ms); subsequent high level processes involved for reading could also start and achieved earlier, thereby leading to shorter fixation duration. One could also argue that with the eyes better aligned on the word, visual analysis and attention process are better thereby, facilitating the reading process. Such a subtle effect of vergence

rehabilitation on the duration of reading fixation is reported for the first time; it reinforces the hypothesis that vergence is a vector of attention, linked with cognitive executive functions (Daniel and Kapoula, 2016). This result and the reduction of regressive saccades corroborate the interpretation above: reading becomes easier thereby, there is less need of making regressive saccades. This is another strong argument for a connection between quality of vergence and reading processes. Finally, saccade disconjugacy and post-saccadic drift disconjugacy were highly correlated for all reading tests and vergence rehabilitation did not modify this relationship. Moreover, this correlation was reinforced after the rehabilitation, shown by higher correlation coefficients in the two reading trials of the fifth session (respectively $r_s = -0.58$ and $r_s = -0.63$, see **Figure 8**). Our observations here are in line with those of Vernet et al. (2008). Such strong correlations are indicative of a central vergence mechanism subtending both the intra saccadic and post-saccadic disconjugacy.

CONCLUSION

In conclusion, vergence rehabilitation with a double-step the research based method improves not only vergence but also binocular control of saccades and fixations during reading. Improvement of binocular coordination would contribute to improvement of single binocular vision and thus to more focused attention which is necessary for reading.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors listed, have made substantial, direct and intellectual contribution to the work, and approved it for publication.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Andrew Unsworth for the English proofing of the manuscript. This research has not been funded by any organization.

REFERENCES

- Alahyane, N., and Pélissou, D. (2005). Long-lasting modifications of saccadic eye movements following adaptation induced in the double-step target paradigm. *Learn. Mem.* 12, 433–443. doi: 10.1101/lm.96405
- Alvarez, T. L., Jaswal, R., Gohel, S., and Biswal, B. B. (2014). Functional activity within the frontal eye fields, posterior parietal cortex, and cerebellar vermis significantly correlates to symmetrical vergence peak velocity: an ROI-based, fMRI study of vergence training. *Front. Integr. Neurosci.* 8:50. doi: 10.3389/fnint.2014.00050
- Alvarez, T. L., and Kim, E. H. (2013). Analysis of saccades and peak velocity to symmetrical convergence stimuli: binocularly normal controls compared to convergence insufficiency patients. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 54, 4122–4135. doi: 10.1167/iops.13-11797
- Alvarez, T. L., Vicci, V. R., Alkan, Y., Kim, E. H., Gohel, S., Barrett, A. M., et al. (2010). Vision therapy in adults with convergence insufficiency: clinical and functional magnetic resonance imaging measures. *Optometry Vis. Sci.* 87, E985–E1002. doi: 10.1097/OPX.0b013e3181fef1aa
- Blythe, H. I., Liversedge, S. P., Joseph, H. S. S. L., White, S. J., Findlay, J. M., and Rayner, K. (2006). The binocular coordination of eye movements during reading in children and adults. *Vision Res.* 46, 3898–3908. doi: 10.1016/j.visres.2006.06.006
- Bucci, M. P., Brémond-Gignac, D., and Kapoula, Z. (2008). Poor binocular coordination of saccades in dyslexic children. *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 246, 417–428. doi: 10.1007/s00417-007-0723-1
- Bucci, M. P., Gomes, M., Paris, S., and Kapoula, Z. (2001). Disconjugate oculomotor learning caused by feeble image-size inequality: differences between secondary and tertiary positions. *Vision Res.* 41, 625–637. doi: 10.1016/S0042-6989(00)00293-5
- Bucci, M. P., and Kapoula, Z. (2006). Binocular coordination of saccades in 7 years old children in single word reading and target fixation. *Vision Res.* 46, 457–466. doi: 10.1016/j.visres.2005.05.004
- Bucci, M. P., Kapoula, Z., Brémond-Gignac, D., and Wiener-Vacher, S. (2006). Binocular coordination of saccades in children with vertigo: dependency on the vergence state. *Vision Res.* 46, 3594–3602. doi: 10.1016/j.visres.2006.06.001

- Collewijn, H., Erkelens, C. J., and Steinman, R. M. (1988). Binocular co-ordination of human horizontal saccadic eye movements. *J. Physiol.* 404, 157–182. doi: 10.1113/jphysiol.1988.sp017284
- Cooper, J., and Feldman, J. (2009). Reduction of symptoms in binocular anomalies using computerized home therapy-HTS. *Optometry* 80, 481–486. doi: 10.1016/j.optm.2009.05.007
- Daniel, F., and Kapoula, Z. (2016). Binocular vision and the stroop test. *Optom. Vis. Sci.* 93, 194–208. doi: 10.1097/OPX.0000000000000774
- Debray, P., Debray, Q., Binoche, T., and Nebout, M. C. (1972). An advance in leximetry: proportional assessment of the Alouette test. *Rev. Neuropsychiat. Infant.* 20, 725–732.
- Dusek, W. A., Pierscionek, B. K., and McClelland, J. F. (2011). An evaluation of clinical treatment of convergence insufficiency for children with reading difficulties. *BMC Ophthalmol.* 11:21. doi: 10.1186/1471-2415-11-21
- Eggert, T., and Kapoula, Z. (1995). Position dependency of rapidly induced saccade disconjugacy. *Vision Res.* 35, 3493–3503. doi: 10.1016/0042-6989(95)00147-7
- Evans, J. R. (2002). *Pickwell's Binocular Vision Anomalies*. London: Butterworth.
- Fioravanti, F., Inchingolo, P., Pensiero, S., and Spanio, M. (1995). Saccadic eye movement conjugation in children. *Vision Res.* 35, 3217–3228. doi: 10.1016/0042-6989(95)00152-5
- Gaertner, C., Bucci, M. P., Ajrezo, L., and Wiener-Vacher, S. (2013). Binocular coordination of saccades during reading in children with clinically assessed poor vergence capabilities. *Vision Res.* 87, 22–29. doi: 10.1016/j.visres.2013.05.006
- Griffin, J. R. (1987). Efficacy of vision therapy for nonstrabismic vergence anomalies. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.* 64, 411–414. doi: 10.1097/00006324-198706000-00005
- Jainta, S., Hoormann, J., Kloke, W. B., and Jaschinski, W. (2010). Binocularity during reading fixations: properties of the minimum fixation disparity. *Vision Res.* 50, 1775–1785. doi: 10.1016/j.visres.2010.05.033
- Kapoula, Z. A., Robinson, D. A., and Hain, T. C. (1986). Motion of the eye immediately after a saccade. *Exp. Brain Res.* 61, 386–394. doi: 10.1007/BF00239527
- Kapoula, Z., Eggert, T., and Bucci, M. P. (1995). Immediate saccade amplitude disconjugacy induced by unequal images. *Vision Res.* 35, 3505–3518. doi: 10.1016/0042-6989(95)00150-D
- Kapoula, Z., Morize, A., Daniel, F., Jonqua, F., Orssaud, C., and Brémond-Gignac, D. (2016). Objective evaluation of vergence disorders and a research based novel method for vergence rehabilitation. *Transl. Vis. Sci. Technol.* 5:8. doi: 10.1167/tvst.5.2.8
- Kliegl, R., Nuthmann, A., and Engbert, R. (2006). Tracking the mind during reading: the influence of past, present, and future words on fixation durations. *J. Exp. Psychol.* 135, 12–35. doi: 10.1037/0096-3445.135.1.12
- Lang, A., Gaertner, C., Ghassemi, E., Yang, Q., Orssaud, C., and Kapoula, Z. (2014). Saccade vergence properties remain more stable over short-time repetition under overlap than under gap task: a preliminary study. *Front. Hum. Neurosci.* 8:372. doi: 10.3389/fnhum.2014.00372
- Lefavrais, P. (1967). *Test de l'Alouette*. Paris: Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Liversedge, S. P., Rayner, K., White, S. J., Findlay, J. M., and McSorley, E. (2006). Binocular coordination of the eyes during reading. *Curr. Biol.* 16, 1726–1729. doi: 10.1016/j.cub.2006.07.051
- Lobier, M., Zoubrinetzky, R., and Valdois, S. (2012). The visual attention span deficit in dyslexia is visual and not verbal. *Cortex* 48, 768–773. doi: 10.1016/j.cortex.2011.09.003
- Nuthmann, A., and Kliegl, R. (2009). An examination of binocular reading fixations based on sentence corpus data. *J. Vis.* 9, 1–28. doi: 10.1167/9.5.31
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychol. Bull.* 85, 618–660. doi: 10.1037/0033-2909.85.3.618
- Rayner, K., Liversedge, S. P., and White, S. J. (2006). Eye movements when reading disappearing text: the importance of the word to the right of fixation. *Vision Res.* 46, 310–323. doi: 10.1016/j.visres.2005.06.018
- Rouse, M. W., Borsting, E. J., Mitchell, G. L., Scheiman, M., Cotter, S. A., Cooper, J., et al. (2004). Convergence insufficiency treatment trial group. Validity and reliability of the revised convergence insufficiency symptom survey in adults. *Ophthalmic Physiol. Opt.* 24, 384–390. doi: 10.1111/j.1475-1313.2004.00202.x
- Scheiman, M., Rouse, M., Kulp, M. T., Cotter, S., Hertle, R., and Mitchell, G. L. (2009). Treatment of convergence insufficiency in childhood: a current perspective. *Optom. Vis. Sci.* 86, 420–428. doi: 10.1097/OPX.0b013e31819fa712
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Kipffer-Piquard, A., Pinton, F., and Billard, C. (2009). Reliability and prevalence of an atypical development of phonological skills in French-speaking dyslexics. *Read. Writ.* 22:811. doi: 10.1007/s11145-008-9117-y
- Takagi, M., Oyama, H., Abe, H., Zee, D. S., Hasebe, H., Miki, A., et al. (2001). Adaptive changes in dynamic properties of human disparity-induced vergence. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 42, 1479–1486.
- Valdois, S., Bosse, M. L., Ans, B., Carbonnel, S., Zorman, M., David, D., et al. (2003). Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: evidence from two case studies. *Read. Writ.* 16, 541–572. doi: 10.1023/A:1025501406971
- Vernet, M., and Kapoula, Z. (2009). Binocular motor coordination during saccades and fixations while reading: a magnitude and time analysis. *J. Vis.* 9:2. doi: 10.1167/9.7.2
- Vernet, M., Yang, Q., Daunys, G., Orssaud, C., Eggert, T., and Kapoula, Z. (2008). How the brain obeys Hering's law: a TMS study of the posterior parietal cortex. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 49, 230–237. doi: 10.1167/iiov.07-0854
- Von Noorden, G. K. (2002). *Binocular Vision and Ocular Motility. Theory and Management of Strabismus, 6th Edn*. St. Louis: Mosby.
- Wilkins, A. J., Jeanes, R. J., Pumfrey, P. D., and Laskier, M. (1996). Rate of Reading Test: its reliability, and its validity in the assessment of the effects of coloured overlays. *Ophthalmic Physiol. Opt.* 16, 491–497. doi: 10.1046/j.1475-1313.1996.96000282.x
- Yang, Q., and Kapoula, Z. (2003). Binocular coordination of saccades at far and at near in children and in adults. *J. Vis.* 3, 554–561. doi: 10.1167/3.8.3

Conflict of Interest Statement: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2016 Daniel, Morize, Brémond-Gignac and Kapoula. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Dysfonctionnements de la synergie vergence et accommodation chez les jeunes adultes : impact sur les saccades, la lecture et la cognition.

La qualité de la vision sensorielle, l'aspect oculomoteur et la cognition ont très souvent été abordés de façon individuelle. D'un côté, les désordres de la vergence, liés fréquemment à des désordres de l'accommodation, entraînent des symptômes tels que douleurs, diminution de la qualité de vision mais aussi problèmes d'attention et de concentration, pouvant avoir une incidence sur l'apprentissage. D'un autre côté, les désordres de la vergence sont aussi liés à des problèmes oculomoteurs dans la coordination et la précision des saccades, domaine sur lequel repose l'aptitude à la lecture. L'ambition de cette thèse est d'approfondir ces constats et d'introduire des moyens expérimentaux afin de mettre en évidence les liens entre accommodation/vergence (A/V), contrôle des saccades et leur interférence avec la cognition. Dans une première partie, nous avons étudié l'impact des dysfonctionnements A/V classique et l'impact d'un conflit A/V induit sur les performances au test de Stroop, reconnu pour évaluer certains types de fonctions cognitives, faisant appel aux capacités basiques de lecture et exigeant un déploiement attentionnel élevé. Pour une population d'étudiants, les résultats ont montré des performances diminuées en cas de désordres de la vergence existant et en cas de conflit A/V induit, attestant d'une incidence négative des dysfonctionnements et des déséquilibres A/V induits sur les fonctions exécutives et les processus attentionnels. Ici, l'hypothèse d'une interaction des processus visuels et cognitifs en parallèle apparaît plus plausible que celle d'un modèle sériel, avec une performance cognitive retardée par un problème visuel. Dans un deuxième temps, une réhabilitation de la vergence chez les sujets en présentant des désordres a permis une restauration des capacités, a montré une amélioration de la coordination des saccades et a eu une incidence positive sur l'aspect cognitif pendant la lecture, venant confirmer la théorie d'interférence en parallèle. L'ensemble des travaux apportent des ouvertures de recherches (1) sur le plan théorique, en croisant des domaines comme la neurologie, la psychologie cognitive, l'oculomotricité, l'optométrie et l'orthoptie ; (2) sur le plan clinique, en proposant des tests caractéristiques de dépistage ainsi que des solutions d'amélioration ; (3) sur le plan éducatif, en proposant des pistes pour expliquer l'incidence que le système visuel peut avoir sur les performances académiques.

Mots clefs : Vergence, accommodation, dysfonctionnement, coordination motrice binoculaire, lecture, cognition

Effect of vergence/accommodation synergy on binocular coordination of saccades and cognition.

Quality of sensory vision, eye movements and cognition have been broached one by one so far. However, recent studies suggest possible interactions between these fields without clarifying the link. On the one hand, vergence/accommodative (V/A) dysfunctions leads to visual symptoms like sore eyes, blurry or double vision but also problems of attention, concentration, and appear to have a negative impact on academic performances. On the other hand, people diagnosed with vergence disorders also show poor coordination of their saccades, which are essential in reading and cognitive demanding activities. The goal of this thesis is to go into this analysis in depth and to propose experimental ways to evidence the links between V/A disorders, control of the saccades and their influence on cognition. In a first part, we studied the impact of typical V/A disorders and the impact of an induced A/V conflict on the performances during the Stroop test, which is a neurological test known for evaluating cognitive executive functions like inhibition, demanding a high attentional deployment and stimulating basic reading skills. Results show that vergence dysfunctions and V/A induced conflict have a negative influence on the Stroop performances in students, leading to a diminished control of cognitive functions. These results suggest a more parallel interaction between visual and attentional processes instead of a serial model where vision would be a prerequisite to cognition, slowing down the cognitive processes when disturbed. Secondly, we pursue this theory: vergence rehabilitation in subjects diagnosed with vergence disorders permitted an increase of the vergence capacities, showed an improvement on the coordination of the reading saccades and had a positive influence on the cognitive aspect during reading. This work gives new research possibilities at different level: (1) at a theoretical level, it permits to cross fields like neurology, cognitive psychology, eye movements and optometry; (2) at a clinical level, it suggests typical tests for a more efficient screening and opens new perspectives on solutions to rehabilitate people with V/A disorders; (3) at an educational level, it gives clues on how visual functions could affect academic performances.

Keywords: Vergence, Accommodation, dysfunctions, binocular motor coordination, reading, cognition