

Université de Montréal

Mesure de cohérence stéréoscopique : effet du vieillissement et du
microstrabisme

par

Stéphane Laframboise

École d'optométrie

Mémoire présenté à la faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise (M.Sc.)
en sciences de la vision
option sciences fondamentales

Juin 2006

© Stéphane Laframboise, 2006



WW

5

058

200p

V.004

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Mesure de cohérence stéréoscopique : effet du vieillissement et du
microstrabisme

présenté par

Stéphane Laframboise

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Jacques Gresset
Président-rapporteur

Jocelyn Faubert
Directeur de recherche

Danielle De Guise
Codirectrice de recherche

Pierre Forcier
Membre du jury

RÉSUMÉ

La vision stéréoscopique, chez l'humain, est le niveau le plus évolué de la vision binoculaire. La séparation horizontale entre les deux yeux, qui perçoivent en partie une même portion de l'espace, engendre des petites différences entre les images rétiniennes obtenues. Après comparaison, ces différences permettent au cerveau de recréer la troisième dimension à partir de deux images bidimensionnelles. Un aspect peu connu de ce processus est la capacité du système visuel à jumeler correctement les objets perçus par chacun des deux yeux, même dans des situations où plusieurs possibilités de jumelage sont présentes.

Nous disposons actuellement de plusieurs tests cliniques permettant d'évaluer les performances du système stéréoscopique d'un individu. Par contre, le fonctionnement de ce mécanisme n'est pas encore entièrement compris malgré qu'il ait été l'objet d'un grand nombre de recherches depuis plusieurs siècles au niveau psychophysique et, plus récemment, au niveau neurologique. Ce mémoire porte sur un nouveau type de test applicable dans un environnement clinique permettant l'évaluation d'un aspect peu connu de la stéréoscopie. Ce test sollicite la capacité du système visuel à jumeler des images présentant divers degrés de cohérence binoculaire pour en extraire l'information stéréoscopique.

La première étude évalue les performances d'une population clinique sans anomalie de la vision binoculaire soumise à ce nouveau test. L'effet du vieillissement normal était également d'un intérêt particulier lors de cette étude. Nos résultats démontrent une certaine robustesse du système binoculaire face à une perte de corrélation interoculaire pour la détection de surfaces stéréoscopiques dans un stéréogramme à points aléatoires. Nos résultats indiquent également une baisse légère, mais significative, de performance chez les sujets les plus âgés. L'analyse révèle finalement une corrélation modérée entre les performances à ce test et celles obtenues au test de stéréoaucuité traditionnel Randot, bien que les facteurs communs soient difficiles à établir entre les mécanismes impliqués.

La deuxième étude évalue les effets de certaines anomalies de la vision binoculaire, comme le microstrabisme et l'amblyopie anisométrique de petite amplitude, sur les succès obtenus à ce nouveau test. L'ensemble de ce groupe de sujets anormaux a obtenu des résultats plus faibles que le groupe de sujets normaux impliqué dans la première étude. L'analyse des résultats démontre une bonne performance des sujets microstrabiques. D'un autre côté, l'analyse qualitative des résultats indique une tendance à la baisse des performances pour les sujets présentant une amblyopie plus importante. Toutefois, possiblement dû au nombre restreint de sujets, l'analyse statistique ne confirme pas cette tendance. Suite aux observations, nous croyons qu'il existe une dissociation au niveau de la perception de la profondeur et de la forme lorsque l'on regarde un stéréogramme à points aléatoires. Ces stéréogrammes, qui se retrouvent dans certains tests cliniques, seraient d'ailleurs susceptibles d'être utilisés de façon inappropriée par les cliniciens.

Mots clés

Vision binoculaire, stéréoscopie, stéréogramme à points aléatoires, cohérence, corrélation inter-oculaire, vieillissement, microstrabisme, amblyopie

SUMMARY

Stereopsis, in humans, is the most evolved level of binocular vision. The horizontal separation between both eyes, which partially perceive the same portion of the surrounding space, yields slight differences between the two retinal images. These differences allow the brain, following comparison, to generate a three-dimensional view with two two-dimensional images. A poorly known aspect of this processing is the capacity of the visual mechanisms to correctly match the objects viewed by both eyes, even in situations where there are many possible matches.

We actually benefit from many available clinical tests allowing us to evaluate the capacities of the stereoscopic system of a patient. On the other hand, how this mechanism works is not fully understood even though it has been the object of many psychophysical researches over centuries and, more recently, neurologic researches. This memoir is about a new clinical test allowing the evaluation of a poorly known aspect of stereopsis. This test challenges the capacity of the visual system to match images presenting different degrees of correlation to extract the stereoscopic information.

The first study measures the performances of a normal clinical population obtained with this new test. The effect of normal aging was also of particular interest in this study. Our results demonstrate a certain robustness of the binocular system in front of a loss of interocular correlation for the detection of stereoscopic surfaces in random-dot stereograms. Our results also indicate a slight, but significant, loss of performance for the elderly. Finally, the analysis reveals a moderate correlation between performances to this test and the traditional Randot stereotest, but the common factors are difficult to establish between the involved mechanisms.

The second study measures the effect of the presence of mild sensorial deficits, like microstrabismus and slight anisometropic amblyopia, on the performances to the new test. This group of abnormal subjects obtained poorer results than the normal group. Analysis of the results revealed a good success rate of the microstrabismic subject. On the other hand, qualitative analysis indicates a trend toward poor performance for the

subjects with more important amblyopia, but the trend cannot be statistically proven. Following these observations, we believe that there is a dissociation between depth and shape perception in random-dots stereograms. Therefore, these stereograms, which can be found in some clinical stereotests, would be at risk of being misused by clinicians if the instructions given to the patients are not correct.

Keywords

Binocular vision, stereopsis, random-dots stereogram, interocular correlation, aging, microstrabismus, amblyopia

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
SUMMARY	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	vii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	viii
REMERCIEMENTS	ix
Chapitre I.....	1
INTRODUCTION.....	1
DÉFINITIONS	4
1. Stéréoscopie	4
2. Stéréogrammes à points aléatoires	10
3. Corrélation inter-oculaire	12
4. Amblyopie.....	14
5. Microstrabisme.....	15
6. Stimuli de premier ordre et de deuxième ordre.....	16
RECENSION DE LA LITTÉRATURE.....	18
1. Cohérence inter-oculaire	18
2. Vieillessement.....	22
3. Amblyopie et microstrabisme	25
Chapitre II	27
PARAMÈTRES DU TEST SOUS OBSERVATION.....	27
MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE.....	29
Chapitre III	31
ARTICLE 1: Effect of Aging on Stereoscopic Interocular Correlation.....	31
Abstract	33
Introduction	34

Materials and Methods	36
Results	38
Discussion	41
Acknowledgement.....	42
References	48
Chapitre IV	50
ARTICLE 2: Dissociation between shape and stereoscopic processing in random-dot stereograms for patients with mild sensory deficits.....	50
Abstract	52
Introduction	53
Materials and Methods	55
Results	58
Discussion and conclusion	60
References	66
Chapitre V	68
DISCUSSION GÉNÉRALE DES RÉSULTATS	68
Chapitre VI.....	71
CONCLUSION	71
BIBLIOGRAPHIE	73
<i>Annexe : Effect of Aging on Stereoscopic Interocular Correlation</i>	<i>82</i>

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Chapitre I

Figure 1 : Schéma illustrant la stéréoscopie (adapté de Saladin, 2005).....	5
Figure 2 : Stéréoscope de Wheatstone	6
Figure 3 : Schéma simplifié des voies dorsale et ventrale (adapté de Nieder, 2003).....	7
Figure 4 : Exemple de stéréogramme à points aléatoires.....	11

Chapitre III

Table I : IOC data for the 100 subjects divided into age groups.....	43
Figure 1 : Examples of stimuli used.....	44
Figure 2 : Interocular correlation as a function of age	45
Figure 3 : Stereoacuity as a function of interocular correlation.....	46
Figure 4 : Stereoacuity as a function of age.....	47

Chapitre IV

Table I : Visual characteristics of the 9 subjects.....	63
Figure 1 : Examples of stimuli used.....	64
Figure 2 : Interocular correlation as a function of visual acuity	65

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

arcmin	: minutes d'arc, unité de mesure d'angle
arcsec	: secondes d'arc, unité de mesure d'angle
CGN	: corps genouillé latéral
CIO	: cohérence (ou corrélation) inter-oculaire
cpd	: cycles par degré, unité de mesure de fréquence spatiale
IOC	: <i>interocular correlation</i> , cohérence (ou corrélation) inter-oculaire
mm	: millimètre, unité de mesure de longueur
msec	: milliseconde, unité de mesure de temps
RDS	: <i>random-dot stereogram</i> , stéréogrammes à points aléatoires
°	: degré, unité de mesure d'angle
'	: minute d'arc, unité de mesure d'angle
"	: seconde d'arc, unité de mesure d'angle

REMERCIEMENTS

J'aimerais avant tout remercier mon directeur de maîtrise, Dr Jocelyn Faubert, ainsi que ma codirectrice, Dre Danielle De Guise, pour le partage de quelques-unes de leurs nombreuses connaissances. Leur présence, leur support continu et leurs nombreux conseils m'ont été d'une aide inestimable dans l'avancement de mon projet.

Un merci amical à tous les membres du laboratoire de Jocelyn Faubert pour leurs judicieux conseils, leurs commentaires pertinents ainsi que le support informatique essentiel au bon déroulement de ce projet.

Finalement, je désire remercier spécialement toute ma famille, mes amis et particulièrement Claudine pour leur support et leurs encouragements constants.

INTRODUCTION

La stéréoscopie est notre capacité à évaluer les profondeurs et les reliefs des objets que nous percevons visuellement. Elle est le résultat d'un processus complexe qui recrée mentalement la troisième dimension suite à l'analyse des subtiles différences présentes entre les images bidimensionnelles des deux yeux.

L'évaluation de la stéréoscopie par les optométristes fait partie, en général, du bilan complet de la vision d'un patient. Les tests stéréoscopiques sont très complexes d'un point de vue neuro-physiologique. Ainsi, les différents tests disponibles auprès des cliniciens sont parfois difficiles à interpréter et comparer.

Les performances obtenues aux tests stéréoscopiques ont plusieurs significations cliniques, même si la perception des profondeurs du patient n'est pas toujours la première préoccupation du clinicien. Ainsi, une bonne performance au test de stéréoscopie est requise pour la pratique de certains corps de métier comme les pilotes d'avions et les policiers. De plus, la personne qui réussit bien un test stéréoscopique est moins susceptible de présenter une anomalie sévère de la vision binoculaire. La stéréoscopie est donc perçue un peu comme le baromètre du système visuel et principalement de la vision binoculaire.

Plusieurs études ont identifié des facteurs pouvant être responsables d'une baisse de performance liée à une tâche stéréoscopique. Parmi ceux-ci, on retrouve notamment un défaut important de réfraction non corrigé (amétropie), l'amblyopie, le strabisme ainsi que le vieillissement normal. Les amétropies sont assez facilement détectables et corrigeables pour les cliniciens. Par contre, l'amblyopie et le strabisme présentent des menaces plus sérieuses pour la vision et des défis plus importants pour les cliniciens. Ces conditions peuvent tout de même être traitées, particulièrement si l'anomalie est détectée très tôt dans la vie de la personne atteinte. Il faut donc dépister ces anomalies

aussi rapidement que possible et les tests stéréoscopiques sont fréquemment utilisés à cette fin, principalement auprès des enfants.

Bien que les tests actuellement disponibles auprès des cliniciens soient largement utilisés et généralement acceptés, ils sont toutefois l'objet de certaines critiques. Parmi les faiblesses de ces tests, il y a la présence d'indices monoculaires et la possibilité d'utiliser d'autres mécanismes (comme la rivalité et la mémorisation des réponses) qui peuvent faciliter la performance au test. Ces travers peuvent fausser les résultats obtenus et rendent ces tests stéréoscopiques moins efficaces comme outils de dépistage.

Dans la présente étude, les deux expérimentations présentées sous forme d'articles visent à évaluer l'utilité d'un nouveau type de test stéréoscopique clinique qui a été développé à l'École d'optométrie de l'Université de Montréal. Ce test est fondé sur la capacité de détection de la cohérence entre les deux yeux par le système visuel pour percevoir une image stéréoscopique. Les paramètres utilisés pour ce test permettent d'éviter certains défauts influençant les autres tests. La première portion de cette étude porte sur les résultats d'une population clinique normale et dépourvue d'anomalies de la vision à ce nouveau test. L'effet du vieillissement normal sur les performances accomplies à ce test a été particulièrement surveillé. Le deuxième article porte sur les résultats de sujets présentant de légers troubles de la vision binoculaire comme le microstrabisme et l'amblyopie anisométrique de faible amplitude.

Quelques définitions ainsi qu'une recension de la littérature précèdent ces deux articles. La recension de la littérature se divise en trois sections. La première résume ce qui a été apporté par la communauté scientifique dans le domaine de la cohérence et de la corrélation inter-oculaire. La deuxième section synthétise ce qui est connu du vieillissement du système visuel humain et particulièrement en ce qui concerne la perception stéréoscopique. Finalement, la troisième portion porte sur les effets du microstrabisme et de l'amblyopie au niveau de la perception de la troisième dimension.

Puisque les deux articles sont cosignés, il est nécessaire de faire une brève description de l'apport de l'étudiant et du rôle des coauteurs à la réalisation de chacun des articles. Le recrutement des sujets, les expérimentations, l'analyse statistique des résultats et l'écriture des articles ont été effectués par l'étudiant. La programmation du logiciel informatique permettant la création des chartes du test a été confiée à des programmeurs en informatique. Les coauteurs ont guidé l'étudiant dans la détermination des paramètres du test et le choix de la problématique des articles. De plus, ils ont conseillé l'étudiant lors de l'analyse des résultats et de la rédaction des articles.

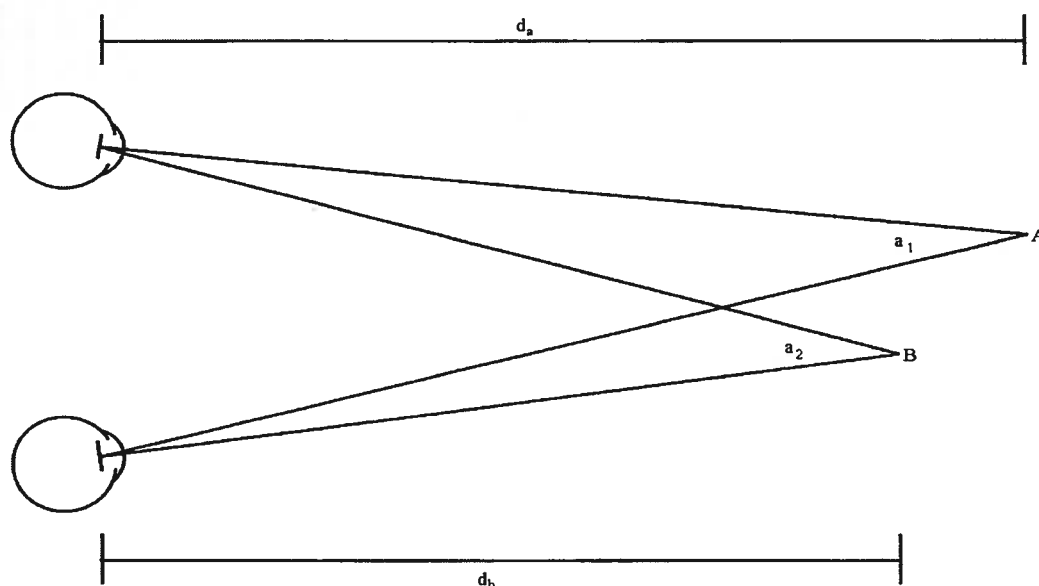
DÉFINITIONS

1. Stéréoscopie

La stéréoscopie est définie comme étant la position relative des objets visuels en profondeur, ce qui est la troisième dimension (Von Noorden, 1996). L'origine du mot est dérivée des mots grecs *stereos* qui signifie solide et *skopein* qui se traduit par voir ou observer (Sekuler et Blake, 2002). Même si elle est parfois attribuée à certains indices monoculaires ou de mouvements de parallaxe, la stéréoscopie est habituellement reconnue comme étant un bénéfice de la vision binoculaire. En effet, posséder deux yeux qui perçoivent une même portion de l'espace simultanément nous facilite les tâches impliquant l'estimation des profondeurs. La séparation horizontale entre les deux yeux cause une légère différence d'angle de perception entre les divers objets qui nous entourent selon la distance qui nous en sépare. Cette séparation horizontale des deux yeux entraîne également des petites différences entre les deux images obtenues au niveau oculaire, ce qui est connu sous le terme disparités rétiniennes. Le système visuel recrée les différences angulaires présentes entre les objets perçus suite à l'analyse de ces disparités rétiniennes. La troisième dimension peut ainsi être évaluée assez précisément grâce aux différences d'angles de perception entre les deux yeux. Il est bon de noter que, sans la vision binoculaire, le système visuel est tout de même en mesure d'estimer les distances à l'aide des indices monoculaires, mais il perd en précision et efficacité et certaines tâches peuvent devenir impossibles à accomplir.

La figure 1 nous permet d'illustrer le principe de la stéréoscopie. Les objets A et B forment les angles a_1 et a_2 respectivement avec les deux yeux. Si les objets sont situés à des distances différentes des yeux ($d_a \neq d_b$), les angles a_1 et a_2 sont nécessairement différents. Cette différence d'angles est perçue grâce aux disparités rétiniennes et la position relative de chaque objet peut ainsi être évaluée.

Figure 1 : Schéma illustrant la stéréoscopie (adapté de Saladin, 2005)

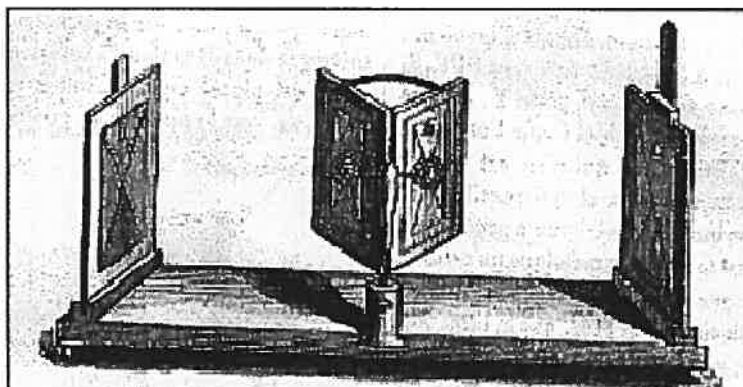


Les chercheurs ont découvert relativement récemment les mécanismes de la stéréoscopie et les avantages qui en découlent. Pendant bien longtemps, il fut admis que la position motrice des yeux était responsable de l'estimation des profondeurs. Pourtant, la vision binoculaire a fait l'objet de recherches depuis plusieurs centaines d'années, mais les moyens pour prouver que ce sont les disparités rétinienne qui sont responsables de la vision stéréoscopique ont longtemps fait défaut (Crone, 1992).

Charles Wheatstone (1838) fut le premier à amener la théorie que ce sont les petites différences entre les perceptions des deux yeux qui procurent la vision en trois dimensions. Il fut également l'inventeur du stéréoscope, ce qui lui permit de prouver cette théorie. La figure 2 montre une illustration représentant le stéréoscope de Wheatstone. Ce stéréoscope présente à un observateur, grâce à des miroirs, deux images planes de façon à ce que chaque oeil de l'observateur ne puisse percevoir qu'une seule image de la paire. Les images représentent un même objet, mais l'image de l'oeil droit montre l'objet perçu selon l'angle de l'oeil droit et l'image de gauche est celle de l'objet vu sous l'angle de l'oeil gauche. Elles sont donc presque identiques, mais comportent des disparités très légères entre elles. L'objet unique perçu suite à la fusion des deux images par le système visuel semble être bien solide et en trois

dimensions. L'analyse des petites disparités rétiniennes provoque donc une impression de profondeur. Cette perception peut même être « trompée » par l'observation de deux images planes lorsqu'un stéréoscope est utilisé. Lorsque les disparités sont dirigées de façon médiane (déplacement de l'image perçue par l'oeil droit vers la gauche de l'observateur et vice versa), l'impression obtenue se trouve plus en avant que le plan de fixation et on parle alors de disparité croisée. L'inverse procure une sensation vers l'arrière du plan et se nomme disparité décroisée. Cette forme de stéréoscopie qui résulte de disparités entre des objets visibles monoculairement sera nommée stéréoscopie locale ou stéréoscopie de contour (Crone, 1992; Saladin, 2005).

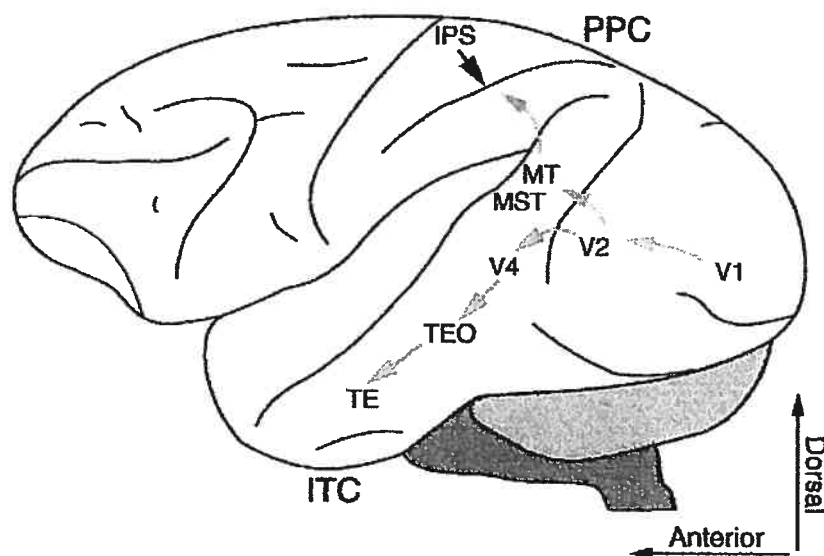
Figure 2 : Stéréoscope de Wheatstone



L'avènement de la preuve physiologique de la perception des disparités rétiniennes revient à Barlow, Blakemore et Pettigrew en 1967. Ils sondèrent le cortex cérébral du chat (et plus tard celui du singe) à l'aide de microélectrodes pour mesurer la réponse des cellules corticales en fonction des stimuli présentés devant les yeux de l'animal. Ils démontrèrent ainsi qu'une sous-population de cellules visuelles corticales située dans l'aire visuelle V1 ne répond qu'à des stimuli ayant une certaine disparité binoculaire (Barlow et al, 1967; Crone, 1992; Kemp, 1998). Par la suite, d'autres chercheurs ont investigué les autres aires du système visuel cortical. Il reste plusieurs questions à élucider, mais on sait que, suite aux premières analyses en V1, l'information stéréoscopique est ensuite relayée vers l'aire visuelle V2 puis elle emprunte deux voies distinctes, soit la voie dorsale et la voie ventrale, où elle subira d'autres

transformations et analyses pour finalement provoquer la perception consciente de la profondeur (Rose et Price, 1995; Cumming et DeAngelis, 2001; Nieder, 2003). La figure 3 montre un schéma simplifié du cortex et des voies ventrales et dorsales empruntées par l'information visuelle stéréoscopique.

Figure 3 : Schéma simplifié des voies dorsale et ventrale (adapté de Nieder, 2003)



La détection des petites disparités rétinienne est donc de première importance dans l'appréciation de la troisième dimension. Toutefois, il est intéressant de noter que certaines études démontrent qu'il est possible de localiser en profondeur des images qui sont entièrement différentes entre les deux yeux. La présentation de paires stéréoscopiques disparates (comme une ligne horizontale dans un oeil et une ligne verticale dans l'autre ou un « O » et un « X ») donne tout de même une certaine sensation qualitative de stéréoscopie, surtout pour de grandes disparités (plus de 30 minutes d'arc) (Mitchell et O'Hagan, 1972; Kaye, 1978; Mallot et al, 1996). Lorsque de telles images sont présentées brièvement (100 msec), les yeux entament un mouvement de vergence vers la localisation stéréoscopique du stimulus de façon identique à ce que des images semblables auraient déclenché. Par contre, des stimuli dissemblables ne peuvent être fusionnés et le mouvement de vergence ne se termine pas de façon à placer ces stimuli sur des points rétinien correspondants. Il est tout de

même intéressant d'observer une certaine sensation de profondeur pour des stimuli n'ayant aucune cohérence entre les deux yeux.

Comme pour toutes les capacités du système visuel, l'amplitude des disparités pouvant être détectées est limitée et on peut ainsi définir une acuité stéréoscopique en évaluant la plus petite disparité perceptible par un sujet. Suite à des études, il a été démontré que la stéréoscopie peut se manifester pour des disparités aussi faibles que 2 à 7 secondes d'arc chez des sujets expérimentés. Toutefois, une limite de 15 à 30 secondes d'arc mesurée en clinique est considérée excellente (Von Noorden, 1996).

Bien sûr, les recherches dans le domaine de la vision stéréoscopique ont entraîné d'importants changements dans le monde clinique. La création de tests pour les cliniciens, permettant l'évaluation et la quantification des performances stéréoscopiques de leurs patients, devenait incontournable. L'utilisation clinique de ces tests se fait maintenant dans plusieurs buts.

Premièrement, ces tests permettent de conseiller certains individus en ce qui concerne les métiers qu'ils peuvent exercer. Par exemple, une stéréoscopie normale est requise pour les pilotes d'avion, les policiers et certaines autres professions. Plusieurs occupations nécessitent ainsi une bonne vision stéréoscopique et une diminution ou une perte de cette capacité peut en compromettre l'exercice.

Ensuite, puisque la vision stéréoscopique occupe le sommet de la chaîne visuelle, elle peut servir de « baromètre » de la vision binoculaire (Saladin, 2005). En effet, plusieurs conditions pouvant affecter le système visuel auront un effet néfaste sur la stéréoscopie. Ainsi, les tests stéréoscopiques facilitent la détection et le diagnostic de plusieurs anomalies binoculaires. Les amétropies élevées, le strabisme et l'amblyopie, entre autres, peuvent réduire considérablement les performances aux tests de stéréoscopie fine. Une mauvaise performance à un test stéréoscopique est hautement suspecte quant à la présence d'une de ces conditions, bien que plusieurs autres anomalies du système visuel peuvent également entraîner une diminution de la stéréoacuité. De plus, le traitement lui-même et les suivis de ces conditions sont

également facilités par les tests et exercices stéréoscopiques. Ils procurent des stimuli plus motivants pour le patient et permettent un meilleur contrôle de la suppression dans les cas d'amblyopie et de strabisme (Eskridge et al, 1991).

En 1919, le Howard-Dolman est devenu un des premiers tests utilisés à grande échelle pour l'appréciation de la stéréoscopie. La tâche demandée à la personne sous évaluation consiste à aligner à l'horizontale une tige mobile avec une tige fixe à une distance de six mètres. On peut ainsi mesurer avec une grande précision les capacités stéréoscopiques du sujet. Le test Howard-Dolman a permis de conscientiser les cliniciens face à l'importance de la stéréoscopie, mais il s'avère difficile d'utilisation en clinique et il est maintenant utilisé principalement pour la recherche (Saladin, 2005). En 1942, Verhoeff élabore un test utilisant trois lignes en profondeur devant être appréciées selon leurs profondeurs relatives. Le test de Verhoeff est portable et s'effectue au près (40 cm), ce qui en fait un outil beaucoup plus pratique dans un environnement clinique comparativement au test Howard-Dolman.

En 1947, Wirt introduisit le premier test vectographique utilisant la polarisation croisée permettant de séparer la perception des deux yeux. Le sujet doit alors porter une lunette fabriquée avec un filtre polarisé devant chaque oeil et qui sont orientés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. Il est alors possible de présenter des images polarisées distinctes à l'oeil droit et à l'oeil gauche. Le test de Wirt est constitué de plusieurs groupes de quatre cercles dont un seul est composé d'images ayant une disparité croisée entre les deux yeux. Le patient doit identifier lequel des points lui semble être au-dessus des autres sur chacune des lignes. La disparité, mesurée en secondes d'arc, présente dans le stimulus est de moins en moins importante lorsque l'on progresse vers les lignes du bas. La mesure d'acuité stéréoscopique du sujet est le dernier niveau où il a identifié correctement le stimulus stéréoscopique (Eskridge et al, 1991).

Les points de Wirt ont inspiré le test Titmus commercialisé en 1960 qui reprend les points de Wirt (disposés en losange) en plus de tests plus grossiers comme une mouche et des animaux destinés au dépistage chez les jeunes enfants. Ce test est compacte,

s'effectue à 40 cm, est facile d'utilisation et rapide à administrer. C'est pourquoi le test Titmus est maintenant l'un des tests les plus utilisés. Il présente toutefois l'inconvénient de présenter certains indices monoculaires pouvant aider les sujets qui n'ont pas de stéréoscopie. Ainsi, certains sujets peuvent identifier le cercle qui semble différent des autres sans pour autant le percevoir en trois dimensions (Eskridge et al, 1991; Von Noorden, 1996).

2. Stéréogrammes à points aléatoires

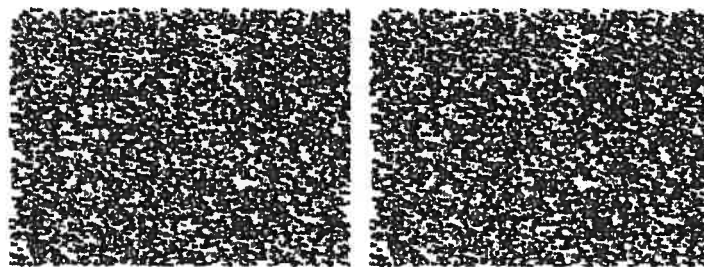
Parmi les études psychophysiques qui ont porté sur la perception de stimuli à partir des disparités rétiniennes, une des plus connues est sans doute celle de Julesz (Julesz, 1960). Dans les années 1960, il publia ses recherches sur les stéréogrammes à points aléatoires créés à l'aide d'ordinateurs (RDS pour *random-dot stereograms*). Les stéréogrammes de Julesz se présentent sous la forme de deux images composées de petits points noirs et blancs (ou différents niveaux de gris) disposés de façon entièrement aléatoire. Les deux patrons de points sont en réalité identiques à l'exception d'une zone de forme prédéterminée qui a subi une translation horizontale dans un des deux motifs. À l'instar du stéréoscope de Wheatstone, chaque oeil regarde une seule des deux images à l'aide d'un miroir ou d'un autre dispositif permettant de séparer la vision des deux yeux. L'observateur qui possède une bonne vision stéréoscopique perçoit alors la forme prédéterminée en trois dimensions soit en avant (stéréoscopie croisée) ou en arrière (décroisée) du plan des motifs aléatoires selon la direction dans laquelle la forme a subi la translation.

Il fut ainsi prouvé que le cerveau n'a pas besoin des indices monoculaires pour permettre l'analyse des disparités et créer la sensation de profondeur. Ces stéréogrammes procurent une sensation d'objet tridimensionnel visible binoculairement sans qu'aucun contour de cet objet ne soit visible monoculairement. L'image est recréée uniquement à partir des disparités rétiniennes présentes entre les motifs de points aléatoires. Ce phénomène fut nommé perception cyclopéenne et fait appel à la stéréoscopie globale qui, contrairement à la stéréoscopie locale, est amenée

par des stimuli ne présentant pas d'objets observables monoculairement (Saladin, 2005).

La figure 4 est un exemple de stéréogramme à points aléatoires. L'observateur normal qui est en mesure de fusionner l'image de droite avec l'image de gauche devrait pouvoir observer la lettre « Q » se tenir en avant du plan de la feuille (si les images sont fusionnées en divergence relative).

Figure 4 : Exemple de stéréogramme à points aléatoires



Il est à noter que les premiers stéréogrammes perceptibles uniquement binoculairement furent rapportés aussi tôt qu'en 1866 par Ernst Mach. Il fut le premier à décrire comment il construisit des stimuli stéréoscopiques qui ne contenaient aucun indice de contour discernable monoculairement. Peu de temps après, autour des années 1870, Ramon y Cajal a développé des stimuli binoculaires grâce à des photographies et a expérimenté la vision stéréoscopique de façon similaire à ce que Julesz fera par la suite à l'aide d'ordinateurs (Bergua et Skrandies, 2000).

Les RDS de Julesz sont rapidement devenus des outils de recherche très importants pour évaluer les mécanismes de vision en trois dimensions. Ils permettent d'étudier exclusivement le processus cortical des disparités binoculaires sans avoir d'interférence avec les indices monoculaires de profondeur.

Julesz a aussi changé les croyances au sujet du processus de corrélation des images et de la perception de la troisième dimension. Il a longtemps été pensé que la perception en trois dimensions se manifestait seulement une fois que le système visuel avait

résolu les objets perçus monoculairement. Il ne suffisait ensuite que de jumeler les objets semblables entre eux et analyser les différences ou disparités pour recréer la troisième dimension. Toutefois, les RDS de Julesz sont venus mettre un terme à cette théorie. Les RDS ne renferment aucun indice monoculaire concernant la forme du stimulus, mais celle-ci est parfaitement visible en condition binoculaire par un observateur normal. Le stimulus est alors perçu exclusivement à partir des disparités binoculaires présentes dans le stéréogramme. La perception des formes en trois dimensions est donc un élément important de la vision stéréoscopique (Julesz, 1960).

Les RDS de Julesz seront utilisés en 1979 par Cooper et al pour développer les tests TNO (anaglyphes rouge-vert) et Randot (vectographes polarisés) qui permettent d'éviter les indices monoculaires qui affectent, entre autres, le test Titmus. Le test Randot, qui est largement utilisé en clinique, comprend maintenant un test de stéréoscopie de contour semblable aux points de Wirt en plus d'un test de stéréoscopie globale et d'un dépistage pour les enfants (Eskridge et al, 1991). Le test de disparité local du Randot présente dix valeurs de disparité allant de 400 secondes d'arc jusqu'à 20 secondes d'arc et un résultat d'au moins 70 secondes d'arc est requis pour passer le test. Le test de dépistage pour enfants est également un test de contour utilisant des animaux comme stimuli. Ce dépistage ne comporte que trois valeurs de disparité, soit 400, 200 et 100 secondes d'arc. Pour la partie de stéréoscopie globale, le test présente six formes géométriques disposées dans huit rectangles ayant des disparités de 500 secondes d'arc ou de 250 secondes d'arc. Le patient doit identifier au moins une forme pour passer le test (Eskridge et al, 1991). Les instructions fournies avec le test suggèrent également que l'identification des rectangles sans forme peut être suffisante pour réussir le test.

3. Corrélation inter-oculaire

Les stéréogrammes de Julesz soulèvent plusieurs questions. Une des plus intrigantes est comment le cerveau réussit-il à jumeler les images perçues par chacun des deux yeux? Il existe dans ces stimuli un problème potentiellement complexe de

correspondance a résoudre. En théorie, étant donné que tous les points ont la même forme, dimension et contraste (le contraste des points est parfois varié dans certains stéréogrammes), chaque point de l'image droite du stéréogramme pourrait être jumelée avec plusieurs points de l'image gauche, ce qui donne un nombre énorme de combinaisons possibles. Pourtant, l'image est perceptible de façon très nette et sans effort apparent par le système visuel.

Une deuxième question pertinente est quel pourcentage de points cohérents est nécessaire pour la perception de la profondeur dans ces stéréogrammes. Pour les RDS, on peut ainsi définir la cohérence (ou corrélation) d'un stéréogramme comme étant la proportion de points placés de façon identique alors que les autres points sont placés aléatoirement entre les deux images. Formellement, pour le cas simple d'un RDS d'une densité de 50% (moitié points noirs et moitié points blancs), la corrélation inter-oculaire (CIO) pour le plan de disparité d nous est donnée par la formule :

$$\text{CIO}(d) = 2P_d - 1$$

Où P_d est la proportion de points correspondant à la disparité d .

Ainsi, si tous les points sont placés de façon identique entre les deux images, la corrélation est de +1 (CIO = 100%). Si tous les points sont aléatoires, puisque la densité est de 50%, chaque point a 50% de probabilité d'avoir un point correspondant dans l'image complémentaire pour la disparité d ($P_d = 0,5$) et la corrélation est alors de 0 (CIO = 0%). Dans le cas où la moitié des points sont identiques et les autres sont aléatoires ($P_d = 0,5 + 0,5 \times 0,5 = 0,75$) la corrélation inter-oculaire est de 50%. Si un patron présente les contrastes opposés à l'autre patron (un point blanc correspond à un point noir et vice versa), la corrélation est alors de -1 et on peut la qualifier également d'anti-corrélation (Tyler et Julesz, 1978; Cormack et al, 1991; Stevenson et al, 1991).

Pour en simplifier le fonctionnement, il peut être utile de séparer le processus de perception stéréoscopique en différents stages (Harris et Parker, 1994):

- 1) L'information des deux yeux est combinée et les points sont jumelés.
- 2) La disparité est extraite des points jumelés.

- 3) L'information des disparités est combinée pour former la représentation de la surface tridimensionnelle.
- 4) Une décision est prise concernant la tâche à accomplir.

La combinaison des points correspondants serait donc une étape élémentaire de la perception stéréoscopique. Pourtant, on ne sait pas encore quels sont les mécanismes ni les aires corticales qui sont responsables de la correspondance et de la corrélation entre les deux yeux. On croit toutefois que cette opération s'effectue en aval du cortex visuel V1 puisqu'il a été démontré que les cellules binoculaires de V1 ne peuvent résoudre les problèmes de corrélation (Cumming et Parker, 1997).

4. Amblyopie

L'amblyopie est une condition habituellement unilatérale pour laquelle on retrouve une acuité visuelle inférieure à 6/6 après meilleure correction de l'amétropie et sans qu'il n'y ait présence de lésion organique apparente. Cette condition survient durant les premières années de la vie (avant l'âge de sept à huit ans environ) lors du développement du système visuel et elle est souvent associée au strabisme (déviation d'un œil), à l'anisométrie (différence importante de réfraction entre les deux yeux) ou toutes autres conditions ayant entraîné une dégradation de l'image rétinienne lors du développement du système visuel (Von Noorden, 1996; Moseley et al, 2002). Le traitement traditionnel consiste à corriger la cause de l'amblyopie et ensuite procéder à l'occlusion de l'œil non-amblyope pour favoriser le développement de l'œil atteint. La vitesse de récupération et le résultat final dépendent grandement de l'observance du traitement ainsi que de l'âge du sujet lors de ce traitement. Habituellement, plus l'occlusion est commencée tôt, plus le traitement est efficace.

D'un point de vue anatomique, la majorité des études démontrent une diminution de cellules corticales étant innervées par l'œil amblyope ou les deux yeux au profit des cellules innervées uniquement par l'œil non-amblyope. La perte de cellules corticales

binoculaires entraîne évidemment une diminution des fonctions binoculaires du sujet atteint (Moseley et al, 2002).

Ainsi, outre la perte d'acuité visuelle, on note généralement une baisse de performance aux tests de stéréoacuité fine chez les patients atteints d'amblyopie. Considérant qu'une stéréoscopie de bonne qualité requiert une bonne vision dans les deux yeux et qu'il y a une perte de cellules binoculaires chez les amblyopes, cette constatation n'est pas surprenante. Toutefois cette baisse de performance est souvent moins importante que ce que l'on pourrait supposer suite à la baisse d'acuité visuelle observée, surtout dans le cas de l'amblyopie anisométrique (Eskridge et al, 1991; Von Noorden, 1996). Cette observation soulève d'ailleurs certains doutes quant à l'efficacité des tests stéréoscopiques comme dépistage de l'amblyopie chez les enfants.

5. Microstrabisme

Le microstrabisme est une déviation d'un œil de très petite amplitude (moins de 9 dioptries prismatiques) qui peut passer inaperçue lors d'un examen de la vision normal (Von Noorden, 1996). Contrairement au strabisme de plus grand angle, le test écran est souvent négatif ou la déviation peut être d'un degré trop infime pour être détectée, quoique certains cas peuvent être détectés au test écran. Le microstrabisme se caractérise par une réorganisation des points rétiniens correspondants de telle sorte qu'un point extra fovéal de l'œil dévié acquiert plusieurs caractéristiques de la fovéa (dont la capacité d'assurer la fixation en vision monoculaire : la fixation excentrique). Ces modifications permettent de recréer une vision binoculaire, bien que de qualité inférieure et ce, malgré la présence du strabisme. Il en résulte une légère amblyopie, une zone de suppression centrale, mais les amplitudes fusionnelles sont habituellement normales. Il y a également une association assez étroite entre le microstrabisme et l'anisométrie, particulièrement chez les hypermétropes. Dans plusieurs cas, le microstrabisme pourrait d'ailleurs être secondaire au scotome central qui serait causé par l'anisométrie (Von Noorden, 1996; Harwerth et Fredenburg, 2003).

Une zone de suppression centrale est un inconvénient majeur pour l'acuité stéréoscopique puisque c'est la zone centrale de la rétine qui est responsable pour l'acuité stéréoscopique la plus fine (Saladin, 2005). Ainsi, la stéréoscopie de contour est affectée par le microstrabisme, mais peut tout de même être suffisante pour passer les critères de réussite de certains tests. Par contre, la stéréoscopie globale mesurée avec les formes des stéréogrammes à points aléatoires est souvent très détériorée par le microstrabisme (Lang, 1988). Encore une fois, si seul un test stéréoscopique de contour est effectué, les tests stéréoscopiques peuvent s'avérer inefficaces dans le dépistage de cette condition.

6. Stimuli de premier ordre et de deuxième ordre

Les stimuli de premier ordre sont également connus sous le nom de stimuli de Fourier ou stimuli linéaires. Ils sont formés d'une variation spatiale de la luminance ou de la couleur. La luminance, qui peut être représentée par une fonction sinusoïdale, stimule les cellules corticales situées dans l'aire visuelle V1 qui sont sensibles aux changements de luminance à l'intérieur de leurs champs récepteurs. Le mécanisme de perception de premier ordre filtre ainsi tout le champ visuel à l'aide d'une vaste gamme de récepteurs sensibles à plusieurs fréquences spatiales. (Habak et Faubert, 2000)

Les stimuli de deuxième ordre sont, pour leur part, connus sous le nom de stimuli non-Fourier ou non-linéaires. Ils sont généralement plus complexes à analyser pour le système visuel comparativement aux stimuli de premier ordre. Ils sont caractérisés par une variation de texture, de contraste, de mouvement ou de profondeur de l'objet à percevoir (Habak et Faubert, 2000). La perception des stimuli de deuxième ordre implique l'extraction de l'enveloppe du stimulus qui ne peut pas être perçue par les mécanismes de premier ordre puisque la luminance ne présente pas de variation définissant cette enveloppe. La détection des stimuli non-linéaires s'effectuerait à l'aide de neurones spécialisés étant capables de faire une opération non-linéaire afin de détecter la variation de contraste. Cette opération prendrait place dans les aires

visuelles V1 et V2 avant que l'information ne soit relayée aux autres aires visuelles corticales (Wong et al, 2001).

Il semblerait que le système stéréoscopique ait accès aux deux types d'information provenant des premiers stages de filtration, soit linéaire et non-linéaire (Hess et Wilcox, 1994; Wilcox et Hess, 1997; Edwards et al, 2000). Le système linéaire serait utilisé quand les stimuli sont simples et ne présentent pas d'ambiguïtés de corrélation. Le système non-linéaire interviendrait pour les stimuli plus complexes et qui présentent une cohérence plus ambiguë ou quand il n'y a pas de signal stéréoscopique disponible via les champs récepteurs sensibles à la fréquence spatiale. Il semblerait toutefois que le système de deuxième ordre ait une préférence pour les stimuli plus grossiers alors que les disparités plus fines seraient mieux perçues par le système de premier ordre (Wilcox et Hess, 1997; Wilcox, 1999). De plus, les stimuli de deuxième ordre ne permettraient pas la perception de la forme (comme dans les RDS de premier ordre), mais uniquement de la profondeur (Ziegler et Hess, 1999).

Le test utilisé dans la présente étude serait appelé à stimuler davantage le mécanisme de deuxième ordre pour la perception des stimuli comparativement aux tests cliniques actuellement disponibles. Bien qu'il soit difficile d'évaluer la participation de chaque mécanisme dans la perception des images stéréoscopiques présentées dans les tests traditionnels, il est évident que le processus de premier ordre ne rencontre pas de difficulté pour discerner les stimuli présents. Par contre, le test utilisé dans cette étude présenterait beaucoup plus de difficulté pour le mécanisme linéaire, particulièrement lorsque l'on considère les niveaux où la cohérence est faible entre les deux images. En effet, au fur et à mesure que l'on diminue la corrélation inter-oculaire, le système visuel perd une proportion de plus en plus grande d'éléments définis par la luminance permettant la perception de la profondeur du stimulus. Il doit alors dépendre davantage de l'information de deuxième ordre qui est donnée par l'enveloppe (ou les limites) du stimulus.

RECENSION DE LA LITTÉRATURE

1. Cohérence inter-oculaire

Julesz propose plusieurs utilisations pour les RDS dans son livre *Foundations of Cyclopean Perception* (Julesz, 1971). Il propose, entre autres, des stéréogrammes ayant des niveaux de cohérence de plus en plus faible. Ce sont des stéréogrammes dont une image a été modifiée pour présenter un certain nombre de points n'ayant pas de correspondant dans l'image complémentaire. La tâche du sujet est alors d'identifier la structure tridimensionnelle dans un stéréogramme statique pour différents niveaux de décorrélation. Julesz démontre ainsi que l'effet stéréoscopique peut être perçu malgré un nombre important de points décorrélés présents dans les images. Sans établir de seuil précis, il note au sujet de la perception du phénomène cyclopéen que lorsque la décorrélation des images augmente :

« first the corners of the cyclopean square disappear, but a rounded off area in the centre is still perceived in depth. Loss of stereopsis gradually increases with increasing noise. More and more dots appear at other depth planes than that of the square or its surround. Finally it is impossible to detect an area in the centre as being different to the surround » (Julesz, 1971, p. 275).

Julesz n'a pas poursuivi davantage ses recherches sur cet aspect des RDS, mais il souhaite qu'un clinicien reprenne ce concept et l'applique en masse à une population clinique. Il suggère également les paramètres et conditions des stimuli qu'il souhaiterait voir être utilisés pour une telle entreprise. Toutefois, il préconise l'utilisation d'un ordinateur pour présenter les stimuli sur une très courte période de temps et l'algorithme du test requiert de très nombreuses présentations pour identifier le seuil de corrélation des observateurs. Le temps et l'équipement impliqués dans une telle démarche la rendent malheureusement difficilement applicable dans la réalité clinique actuelle (Julesz, 1971).

Subséquentement, Tyler et Julesz poursuivent les recherches dans le domaine de la corrélation binoculaire. Ils utilisent toujours des patrons de points aléatoires, sans toutefois y inclure de stimuli stéréoscopiques. Il n'y a donc pas de zone présentant des

disparités entre les deux yeux. Les patrons présentés sont composés de points dynamiques (le patron est présenté sur un écran et change dans le temps à une fréquence prédéterminée) comportant différents niveaux de corrélation binoculaire. La tâche de l'observateur est alors d'indiquer si la corrélation, mesurée en pourcentage, entre les deux yeux a changée. Suite à l'étude, les auteurs ont conclu qu'il est plus difficile de détecter une augmentation de la corrélation qu'une baisse de corrélation binoculaire. Dans les meilleures conditions, le système visuel démontre une remarquable sensibilité à la corrélation et peut détecter des changements aussi faibles que 1% de corrélation binoculaire. Les auteurs ont également observé que le système visuel intègre l'information de corrélation spatiale jusqu'à une dimension de trois à cinq degrés carrés. Au-delà de cette limite, les performances ne sont plus influencées par la dimension du stimulus.

D'autres auteurs ont également investigué la détection de la corrélation inter-oculaire par le système visuel (Cormack et al, 1991). Leurs stimuli étaient également des RDS dynamiques présentés sur des écrans cathodiques sans stimulus stéréoscopique. La tâche du sujet était un choix forcé et consistait à déterminer laquelle de deux présentations montrait un stimulus entièrement aléatoire (corrélation de zéro) et laquelle comportait un niveau de corrélation supérieure à zéro. Leurs résultats démontrent que le contraste influence la détection de la corrélation, mais seulement pour les niveaux de contraste très bas. Lorsque le contraste augmente, les performances deviennent indépendantes du contraste et atteignent une limite de détection de corrélation d'environ 10% pour des RDS dynamiques chez des observateurs expérimentés. Lors d'une autre procédure, les auteurs ont également observé une baisse linéaire de la stéréoacuité lorsque la corrélation inter-oculaire diminue et que le contraste est relativement faible (12% selon la méthode de Michelson mesurée sur une image statique). Ils n'ont toutefois pas testé l'effet de la corrélation inter-oculaire sur la stéréoscopie pour des stimuli ayant des contrastes plus élevés ou des images statiques.

L'effet de la densité (quantité de points noirs sur fond blanc ou points blancs sur fond noir) fut également rapportée par Cormack et ses collaborateurs (Cormack et al, 1997).

Le sujet devait encore une fois déterminer laquelle de deux présentations montrait un stimulus dynamique ayant une corrélation supérieure à zéro. L'étude a démontré une efficacité identique pour les stimuli noirs sur fond blanc et les stimuli blancs sur fond noir. Il en ressort également une performance plus élevée des sujets pour les patrons de points ayant une densité d'environ 20%. Les auteurs concluent donc que les RDS conventionnels ayant une densité de 50% ne sont pas optimaux pour évaluer l'efficacité du système visuel binoculaire.

Dans une étude semblable, Muller et al ont démontré que la forme du stimulus a peu d'influence sur la détection de sa cohérence (Muller et al, 2004). Cette observation est vraie tant que le stimulus occupe une surface plus grande que quatre degrés carrés. Ils notèrent également que le mouvement du stimulus (stimulus dynamique) ainsi que la pratique intensive permettent une plus grande facilité dans la tâche de détection de la corrélation.

La littérature scientifique procure donc quelques informations concernant la détection de la corrélation inter-oculaire et la correspondance binoculaire pour des stimuli non-stéréoscopiques et particulièrement pour des conditions dynamiques. Par contre, l'effet de la corrélation (ou décorrélation) sur la perception d'objets stéréoscopiques statiques dans des stéréogrammes à points aléatoires est peu documenté. Les stimuli stéréoscopiques décorrélés seraient plus complexes à résoudre pour le système visuel puisqu'ils impliquent la détection des disparités formant les surfaces tridimensionnelles en plus de la détection de la correspondance binoculaire. Aussi, une importante portion des cellules corticales binoculaires serait capable de répondre à la corrélation sans être impliquée dans le processus stéréoscopique (Livingstone, 1996). Il est donc raisonnable de s'attendre à retrouver des seuils de cohérence plus élevés pour la détection d'objets stéréoscopiques comparativement à ceux obtenus pour la détection de la corrélation.

Les premières démonstrations de Julesz avaient suggéré une certaine robustesse de la perception stéréoscopique grossière face à la diminution de la corrélation inter-oculaire (Julesz, 1971). D'autres études ont toutefois indiqué une baisse de performance pour

certaines tâches impliquant la stéréoscopie fine lors d'une baisse de la corrélation entre les images binoculaires (Cormack et al, 1991; Christophers et al, 1993).

Une récente étude a porté sur certains paramètres influençant la performance des observateurs pour la détection d'un stimulus stéréoscopique lorsque la corrélation inter-oculaire est diminuée (Palmisano et al, 2005). Les sujets devaient identifier quelles présentations montraient une surface sinusoïdale tridimensionnelle en fonction de divers niveaux de corrélation inter-oculaire. Les auteurs ont remarqué une hausse des performances lorsque les stimuli étaient relativement denses (24% comparé à 1%), lorsque la fréquence spatiale du stimulus était abaissée de 0,88 cpd à 0,22 cpd et lorsque l'amplitude du stimulus était augmentée au-delà de 0,5 arcmin. Ils ont également noté une plus grande résistance à la baisse de corrélation pour la perception d'une surface stéréoscopique dans les stéréogrammes dynamiques par rapport aux stéréogrammes statiques, ce qui avait déjà été rapporté par d'autres études (Muller et al, 2004). Dans l'ensemble, les auteurs concluent que la détection de surfaces stéréoscopiques peut tolérer une importante baisse de corrélation des images. Ils rapportent toutefois qu'un plus grand nombre de points corrélés soient nécessaires pour la perception de surface tridimensionnelles par rapport à la simple détection de corrélation inter-oculaire.

Étant donné le nombre restreint de recherches effectuées dans le domaine de la correspondance binoculaire et particulièrement pour la perception de surfaces stéréoscopiques décorréliées, on peut comprendre l'absence de test clinique permettant l'évaluation de ces capacités. Les cliniciens sont donc encore très peu informés et sensibilisés face à cet aspect de la vision binoculaire de leurs patients. Toutefois, en 1995, suite à la demande d'une jeune fille, Jami Weilert, le docteur Jocelyn Faubert a été amené à élaborer un test mesurant les capacités de corrélation binoculaire stéréoscopique. Le test ainsi développé, le *Faubert-Weilert 3D Correspondence Test*, se présente sous forme de chartes pouvant être facilement utilisées dans un environnement clinique. Les chartes sont formées de RDS anaglyphes utilisant des lunettes rouge-verte pour séparer les images entre les deux yeux. Le test s'effectue au près (40 cm) et est constitué de plusieurs rangées de carrés stéréoscopiques. À

l'inverse des tests de stéréoacuité conventionnels, ces chartes présentent des valeurs de disparités constantes pour tous les stimuli, mais des niveaux décroissants de corrélation inter-oculaire (noté en pourcentage) entre chaque rangées d'images. La tâche du sujet est de déterminer correctement si chaque carré est en avant (disparité croisée) ou en arrière (disparité décroisée) du plan de la charte. C'est ce test qui est utilisé dans la présente recherche.

2. Vieillessement

Plusieurs changements causés par le vieillissement normal ont été observés au niveau des structures de l'œil ainsi qu'au niveau neuronal du système visuel. On détient quelques évidences que le vieillissement produit des effets négatifs sur certains aspects de la vision alors que certaines fonctions du système visuel ne semblent pas être affectées. On sait, entre autres, que l'acuité visuelle, la sensibilité aux contrastes et la sommation binoculaire se détériorent avec l'âge, même en l'absence de pathologies oculaires (Faubert, 2002).

Avant même que la lumière n'atteigne la rétine, on remarque une diminution des capacités visuelles de l'oeil chez les personnes plus âgées. Au niveau oculaire, on note une réduction du diamètre pupillaire avec le vieillissement, ce qui entraîne une diminution de l'illumination rétinienne et une perte de sensibilité aux contrastes. D'un point de vue optique, des modifications se produisent dans les médias oculaires, particulièrement au niveau du cristallin. Ces changements se traduisent principalement par une perte de transparence des milieux optiques ce qui cause une diminution de la transmission et une augmentation de la dispersion de la lumière à l'intérieur de l'oeil. Ces changements sont également responsables d'une baisse d'illumination rétinienne et d'une perte de sensibilité aux contrastes (Haegerstrom-Portnoy et al, 1999; Schneck et al, 2000). Une bonne performance visuelle des deux yeux est nécessaire pour obtenir une vision stéréoscopique de qualité. Il serait donc raisonnable de s'attendre à une diminution de performance des sujets âgés face aux tests stéréoscopiques suite à l'observation de la diminution de la qualité optique de leurs yeux.

Au niveau de la rétine, les changements causés par l'âge se retrouvent principalement lorsque l'on observe les bâtonnets. La population de bâtonnets de la rétine peut ainsi diminuer de 30% chez les personnes plus âgées. Par contre, les cônes, qui occupent principalement le centre de la rétine (la région maculaire), sont en grande partie épargnés par le processus de vieillissement normal et on retrouve très peu de variation dans leur nombre en absence de pathologie. Les cellules ganglionnaires semblent également être épargnées par le vieillissement et les changements observés sont faibles comparativement aux variations retrouvées entre les individus (Spear, 1993). Considérant que l'acuité stéréoscopique fine est obtenue par la perception de la rétine centrale et que cette zone ne semble pas être modifiée par le vieillissement normal, les changements rétinien ne semblent pas être susceptibles de causer une perte appréciable de stéréoscopie chez les personnes âgées.

Au niveau des voies visuelles neuronales et corticales, on retrouve également des changements qui surviennent avec le vieillissement normal. Les bases neurologiques de ces changements ne sont pas entièrement comprises, mais il ne semble pas se produire de perte cellulaire le long du cheminement de l'information visuelle. On retrouverait plutôt des changements fonctionnels et une réorganisation au niveau des cellules du système nerveux central. Ces changements seraient assez étendus et produiraient des pertes non-spécifiques de capacité du système nerveux central entraînant les baisses de performance observées chez les personnes âgées (Spear, 1993; Faubert, 2002). Ces changements seraient également susceptibles de causer une perte de performance du système stéréoscopique.

Malgré un nombre important d'études portant sur le sujet, l'effet du vieillissement sur la stéréoscopie est un des aspects de la vision qui n'est pas encore entièrement compris. Certains auteurs mentionnent une capacité stéréoscopique grossière relativement épargnée par le vieillissement (Schneck et al, 2000). Par contre, la majorité des études démontrent que le vieillissement a un effet délétère sur la perception en trois dimensions, surtout pour les capacités de stéréoscopie fine (Wright et Wormald, 1992; Brown et al, 1993; Haegerstrom-Portnoy et al, 1999; Saladin,

2005). Cet effet serait peu marqué et à peu près linéaire pendant les premières décennies, mais serait particulièrement dramatique après la soixantaine (Zaroff et al, 2003; Saladin, 2005). La cause de cette baisse de l'acuité stéréoscopique est toutefois difficile à déterminer et elle a fait l'objet de plusieurs discussions dans la littérature. Selon certains auteurs, cette perte de performance serait causée majoritairement par des changements neurologiques tout au long du parcours visuel (Wright et Wormald, 1992; Yap et al, 1994; Zaroff et al, 2003). D'autres auteurs prétendent toutefois que ce sont plutôt les changements au niveau oculaire tel la transparence des médias et l'intégrité de la rétine qui seraient en cause (Greene et Madden, 1987; Schneck et al, 2000). Il reste encore à élucider dans quelles proportions ces différents facteurs sont responsables de la baisse d'acuité stéréoscopique que l'on retrouve avec le vieillissement normal.

Il a aussi été démontré que les tâches les plus complexes et sollicitant les processus perceptifs de deuxième ordre sont particulièrement affectées par le vieillissement (Habak et Faubert, 2000; Faubert, 2002). Les seuils mesurés pour la perception de stimuli de deuxième ordre démontrent une élévation plus importante que celle observée pour les stimuli de premier ordre chez les personnes âgées. La perception de stimuli de deuxième ordre demanderait une analyse plus complexe que les stimuli de premier ordre. Il en résulte l'implication d'un plus grand nombre de circuits neuronaux pour la perception de stimuli de deuxième ordre et les effets du vieillissement seraient alors cumulatifs dans ces conditions. Les changements fonctionnels observés au niveau cortical auraient donc un plus grand impact et affecteraient davantage la perception de deuxième ordre chez les sujets plus âgés.

Dans une étude portant sur la perception des objets en trois dimensions et le vieillissement, Norman et ses collaborateurs ont déterminé que les personnes âgées (plus de 60 ans) et les plus jeunes (moins de 30 ans) sont affectées de façon similaire par une baisse de la corrélation binoculaire (Norman et al, 2000). Dans les deux groupes, la performance pour la reconnaissance d'une forme stéréoscopique formée de RDS déclinait lorsque la corrélation entre les deux yeux était abaissée. Cette diminution de performance était du même ordre d'amplitude entre les deux groupes.

Les auteurs ont toutefois utilisé des formes plus proéminentes (présentant une plus grande disparité) pour les personnes les plus âgées comparativement aux formes utilisées pour les sujets les plus jeunes. De plus, le niveau de corrélation le plus faible qu'ils aient testé n'était que de 40%.

3. Amblyopie et microstrabisme

Les effets de l'amblyopie sur les performances stéréoscopiques sont assez bien connus et les tests stéréoscopiques sont généralement acceptés comme indicateurs de l'intégrité de la vision binoculaire. Certaines études rapportent toutefois que les tests cliniques traditionnels (particulièrement ceux utilisés en vision de près comme le Randot) peuvent laisser passer certains cas d'amblyopie sans les détecter. Il semblerait donc que les tests utilisés en clinique ne sont pas fiables pour la détection d'anomalies de la vision binoculaire, particulièrement en ce qui concerne l'amblyopie (Cooper et Feldman, 1978; Von Noorden; 1996; Rutstein et Corliss, 2000; Ohlsson et al, 2001). Mentionnons, entre autres, l'étude conduite par Ohlsson et al qui a comparé cinq tests cliniques (Lang II, Frisby, Randot, Titmus et TNO) auprès de 1035 enfants et qui a conclu qu'aucun de ces tests n'est approprié pour le dépistage de l'amblyopie chez des sujets ne présentant pas de strabisme.

Les effets de l'amblyopie ont également été étudiés au niveau de la perception de stimuli de deuxième ordre. Les recherches ont démontré une atteinte de plus grande amplitude des fonctions de deuxième ordre comparativement aux atteintes du premier ordre chez les sujets présentant une amblyopie (Wong et al, 2001; Wong et al, 2005; Mansouri et al, 2005). Ces études suggèrent qu'il y aurait une amplification corticale des pertes de deuxième ordre au-delà des pertes de premier ordre qui surviennent dans l'aire V1. On retrouverait ainsi la majeure partie de ces changements de deuxième ordre dans l'aire visuelle V2. De plus, certaines de ces études ont non seulement rapporté une diminution des performances de deuxième ordre dans l'oeil atteint, mais également dans l'oeil non-amblyope chez leurs sujets anormaux. Cette observation suggère une atteinte particulière des fonctions binoculaires de deuxième ordre chez les

sujets amblyopes. Il serait même probable que les neurones de deuxième ordre soient essentiellement binoculaires (Wong et al, 2001; Mansouri et al, 2005). Wong et al concluent que les neurones de deuxième ordre nécessitent une perception binoculaire normale pour leur développement et que si le traitement de l'amblyopie est tardif, les capacités de perception de deuxième ordre se retrouvent grandement perturbées (Wong et al, 2001).

Plusieurs études rapportent que les sujets microstrabiques conservent une bonne capacité face aux tests stéréoscopiques de contour, même si les performances sont généralement réduites (Clarke et Noel, 1990; Houston et al, 1998; Harwerth et Fredenburg, 2003). D'un autre côté, le microstrabisme semble affecter particulièrement la perception de la stéréoscopie globale (stéréogrammes à points aléatoires) (Cooper et Feldman, 1978; Lang, 1988; Rutstein et Corliss, 2000). Certaines études rapportent même que la totalité de leurs patients microstrabiques ne présentaient aucune perception stéréoscopique dans les stéréogrammes à points aléatoires (Houston et al, 1998). Par contre, d'autres auteurs prétendent avoir obtenu des seuils de stéréoscopies locale et globale semblables en utilisant des stéréogrammes plus larges et des points plus gros pour présenter leurs stimuli (Harwerth et Fredenburg, 2003). Ils expliquent ces résultats en mentionnant qu'il est plus facile pour les patients microstrabiques de fusionner les stéréogrammes plus grossiers comme celui de leur étude. Les stéréogrammes traditionnels seraient trop fins et poseraient un problème de correspondance trop important pour un sujet microstrabique. Il faut toutefois mentionner que la tâche des sujets dans cette dernière étude consistait à déterminer la disparité du stimulus (croisée ou décroisée) représenté par le stéréogramme alors que les tests traditionnels, utilisés en clinique et dans les autres études, nécessitent la reconnaissance d'une forme tridimensionnelle pour les réussir.

*Chapitre II***PARAMÈTRES DU TEST UTILISÉ**

Le test qui sera évalué dans les études qui suivent a été élaboré à partir du *Faubert-Weilert 3D Correspondence Test*, inventé par Jocelyn Faubert en 1995. Ce test présente à l'observateur un stéréogramme à points aléatoires utilisant des lunettes rouge-verte pour séparer la vision de chaque oeil. Les stéréogrammes sont ainsi composés de points rouges, verts et noirs sur un fond jaune. Les stimuli utilisés sont des carrés disposés en six rangées de cinq carrés stéréoscopiques. La tâche du sujet est de déterminer pour chaque stimulus si la disparité est croisée (carré perçu en avant) ou décroisée (en arrière). À l'origine, les chartes développées pour la première version du test étaient divisées en deux catégories : fine et grossière, ce qui se traduisait par des points plus gros et une plus grande disparité des stimuli dans les chartes grossières comparativement aux chartes fines. Toutes les chartes d'une même catégorie utilisaient une même valeur de disparité pour tous les stimuli. Par contre, la valeur de cohérence binoculaire variait entre les rangées et les valeurs utilisées étaient (de haut en bas) : 100%, 85%, 70%, 55%, 40% et 25%.

Suite à un essai clinique auprès de quelques patients avec la première version du test, de nouveaux paramètres ont été déterminés pour la version utilisée dans la présente étude. Le logiciel Matlab a été utilisé pour générer les stéréogrammes avec l'aide de programmeurs en informatique. Le format est très similaire à la version originale et l'utilisation de stéréogrammes rouge-vert sur fond jaune a été conservée. Il a toutefois été décidé de ne présenter que le format fin du stéréogramme. Les points du stéréogramme ont ainsi une grosseur de 0,355 mm de côté et ils soutiennent 180 secondes d'arc (3') à une distance de 40 cm. Les stimuli devant être perçus stéréoscopiquement sont des carrés de 40x40 points de couleur rouge, vert ou noir sur fond jaune. Ce format leur confère une surface d'environ quatre degrés carrés. Ces carrés stéréoscopiques subissent une translation de deux points, ce qui engendre une

valeur de disparité de 360 secondes d'arc (6') toujours pour une distance d'observation de 40 cm.

Les valeurs de corrélation sont plus nombreuses pour cette version du test et elles ont été réparties sur deux formats de charte. Le format « facile » contient les corrélations de 100%, 90%, 80%, 70%, 60% et 50% alors que le format « difficile » présente les valeurs de 60%, 40%, 30%, 25%, 20% et 15%. La corrélation de 60% a été reprise dans la charte difficile pour faciliter la transition entre les deux formats de charte. À l'extérieur des carrés stéréoscopiques, les stéréogrammes ne présentent que des points aléatoires noirs sur le fond jaune qui forment ainsi une surface plane corrélée à 100% à une disparité de zéro. Cette surface sert évidemment de référence pour les réponses des sujets. Un total de six chartes ont été développées, soit trois faciles et trois difficiles. Le signe de la disparité (croisée ou décroisée) attribuée à chaque carré stéréoscopique est entièrement aléatoire.

MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Les deux expériences ont nécessité la participation de sujets aptes à donner leur consentement (ou le consentement des parents) aux recherches et à répondre au test. La première étude recrutait des sujets normaux possédant une bonne acuité visuelle et une bonne acuité stéréoscopique. La deuxième étude recrutait des sujets présentant un léger déficit de la vision binoculaire comme le microstrabisme et l'amblyopie anisométrique de petite amplitude. Dans les deux cas, les sessions d'étude des sujets étaient précédées d'un examen complet de la vision effectué par un optométriste. L'acuité visuelle, l'acuité stéréoscopique au test Randot et la phorie en vision de près mesurée au visiomètre ont ainsi été mesurées et rapportées en plus de la performance au test de cohérence inter-oculaire. De plus, dans la première étude, la disparité de fixation mesurée avec la boîte de Mallet a été évaluée alors que dans la deuxième étude la performance au test de stéréoscopie globale Randot, l'état de la fixation fovéale et la présence de suppression centrale ont été évalués.

Les critères d'inclusion pour la première étude était une acuité visuelle de 6/6 dans chaque œil et une acuité stéréoscopique égale ou supérieure à 50 secondes d'arc. Dans la deuxième étude, les sujets devaient présenter une légère amblyopie anisométrique ou un microstrabisme, mais une stéréoacuité égale ou supérieure à 70 secondes d'arc. L'amblyopie anisométrique était diagnostiquée lorsque l'acuité visuelle de l'œil le plus amétrope ne pouvait être améliorée à 6/6 après correction optique et qu'il y avait présence d'une anisométrie d'au moins 1,50 dioptries. Le microstrabisme était diagnostiqué lorsqu'il y avait, en plus de l'amblyopie, présence de suppression centrale et/ou correspondance rétinienne anormale démontrée avec les lentilles striées de Bagolini. Alternativement, certains cas ont été identifiés grâce au test du prisme de quatre dioptries positif en présence d'un œil légèrement amblyope. Le microstrabisme était souvent confirmé suivant l'observation d'une fixation excentrique perçue à l'ophtalmoscope directe. Dans les deux études, les candidats atteints d'une maladie oculaire ou neurologique étaient exclus.

Le test de cohérence binoculaire était effectué dans un environnement clinique ordinaire en condition photopique. Le sujet devait porter les lunettes rouge-verte par-dessus sa meilleure correction optique pour une distance de 40 cm. Chaque sujet devait répondre au test en identifiant la disparité de chaque image (en avant ou en arrière). Il n'y avait aucune limite de temps imposée aux observateurs. Une des trois chartes faciles était choisie aléatoirement et, si elle était réussie, on présentait ensuite une charte difficile. La dernière valeur de corrélation où le sujet a obtenu au moins quatre bonnes réponses sur cinq est considérée comme le seuil atteint par ce sujet. Le test a été présenté ainsi deux fois (avec des chartes différentes) à chaque sujet et la moyenne des résultats a été utilisée pour l'analyse des résultats.

Chapitre III

ARTICLE 1

Effect of Aging on Stereoscopic Interocular Correlation

Stéphane Laframboise, OD

Danielle De Guise, OD, M.Sc.

Jocelyn Faubert, Ph.D.

ACCORD DES COAUTEURS

Déclaration des coauteurs de l'article 1 du mémoire

1. Identification de l'étudiant et du programme

Stéphane Laframboise ([REDACTED])

M.Sc. : Maîtrise en sciences de la vision

2. Description de l'article

Auteurs : Stéphane Laframboise OD, Danielle De Guise OD M.Sc., Jocelyn Faubert Ph.D.

Titre : Effect of Aging on Stereoscopic Interocular Correlation

Revue : Cet article a été accepté pour publication dans la revue *Optometry and Vision Science (OVS)*

3. Déclaration de tous les coauteurs autres que l'étudiant

À titre de coauteur de l'article identifié ci-dessus, je suis d'accord pour que Stéphane Laframboise inclue cet article dans son mémoire de maîtrise qui a pour titre : « *Mesure de cohérence stéréoscopique : effet du vieillissement et du microstrabisme* ».

Jocelyn Faubert

Coauteur

Signature

Date

Danielle De Guise

Coauteure

Signature

Date

Abstract

Purpose

This study was designed to evaluate the minimum interocular correlation (IOC) needed by the visual system to correctly perceive a static stereoscopic stimulus as a function of normal aging. It was also our goal to evaluate the feasibility of clinical charts testing this aspect of visual perception.

Methods

Stereoscopic IOC threshold was determined in 100 normal observers (average age \pm SD, 45.7 ± 20.4 years) drawn from a clinical population between the ages of 10 and 85. We used partially correlated red-green random-dot stereograms (RDS) displaying flat square surfaces at 360 arcsec of either crossed or uncrossed disparity.

Results

Older observers needed a higher binocular correlation to perceive the stereoscopic stimuli when compared to the younger groups. There is a slight increase in the threshold value of the individuals in the 45-64 year old group and a further effect on the observers over 65 years of age. Data did not reveal any effects of gender, near point phoria or fixation disparity on interocular correlation thresholds.

Conclusions

Normal aging produces a statistically significant deficit in the binocular correlation processing. This process is marginally correlated with stereo acuity measures even when stereoacuity floor effects are factored out. Although more refining is required to obtain optimum parameters, clinical stereoscopic interocular correlation test charts are feasible and do not appear to assess the same processes as stereoacuity charts.

Keywords

Interocular correlation, stereopsis, aging, random-dot stereogram

Introduction

Stereoscopic perception occurs so effortlessly that it could seem to be a simple aspect of visual processing. In fact, it's apparent simplicity hides a process far more complex than we could suspect. One of the most intriguing part of this process is how image points are matched between the two eyes before disparity processing is performed. This step is often called the binocular correspondence problem and is a necessary part of stereoscopic perception.^{1,2,3}

It was thought for a long time that a great deal of monocular processing and shape recognition was a prerequisite for the binocular matching process to occur. However, as demonstrated by Julesz's computer generated random-dot stereograms,⁴ this assumption was overturned by the fact that stereopsis can emerge from the presentation of stereograms where monocular shape recognition is very unlikely. To study the correspondence problem and the correlation threshold, the use of random-dot stereograms (RDS) is of first importance since they are the only type of stimulus that does not contain monocular clues for depth and shape.⁴

In dense (50% density) stereograms, perception of depth is possible only if the interocular correlation (IOC) is above a certain threshold. Therefore, detection of correlation is an important step in stereopsis.⁵

In general, interocular correlation can be described as the degree to which images perceived from both eyes match one another. Interocular correlation in a RDS is the proportion of dots identically positioned at disparity d while the remainder are randomly positioned.^{6,7} Thus an interocular correlation of 100% would be fully correlated, whereas a value of 0% is a purely random stereogram.

The salience of a flat plane at disparity d decreases as we decrease the IOC.^{1,3,5,6} But most of the studies involved used computer generated dynamic stimuli and their tasks required some training to be accurately performed. Since motion and training are now

known to greatly facilitate binocular correlation detection,^{1,8} their results cannot be extrapolated to a clinical evaluation using static stimuli. Thus, it is still not well established how many points need to be correctly matched to form a robust depth perception from a RDS.²

Some abilities decline during normal aging even in the absence of any ocular pathologies, which would be indicative of neural changes in the elderly.⁹ Among these abilities, stereopsis is probably the most indicative of neural changes that can be easily tested by clinicians in office settings. Many authors have concluded that stereoacuity effectively decreases with increasing age even in coarse stereopsis tasks.^{8,10,11,12} They also supposed that this loss in stereopsis can be mostly accounted for by neural changes of the visual pathway, but it is still unclear which factors explain the apparent loss. However, the study performed by Haegerstrom-Portnoy et al on 900 individuals concluded that most of the important decline in coarse stereopsis (performed with the Frisby test) is caused by alterations in early stages of vision processing (i.e. ocular media loss of transparency and retinal dysfunction).¹³

Other studies have reported the significant effect of aging on the processing of second-order stimuli. These stimuli are defined by motion, texture or depth (including RDS) and are more complex to process than first-order stimuli which are defined by luminance or color.¹⁴ Studies demonstrated, some with the help of fMRI, that second-order properties involve additional brain areas and require more extensive processing for the brain to perceive the image.¹⁵ Thus, the larger neural network required for this processing presents additional opportunities to detect the effect of aging on neural functions.¹⁶

The present study evaluates what is the baseline interocular correlation needed by the visual system to still be able to perceive a static flat plane at a given disparity. We also investigated if aging can influence the response of normal observers on such a task. The relationship between gender, Randot stereoacuity, near point phoria and fixation disparity with IOC have also been examined in our study.

Materials and Methods

Subjects

A total of 100 subjects (mean age \pm SD, 45.7 ± 20.4 years) were randomly chosen in an optometric clinical population. We tried to evenly distribute the observers among four age groups. Those age groups were respectively 10 to 25 (n=21; mean age \pm SD, 16.9 ± 3.9 years), 26 to 45 (n=26; 36.5 ± 5.9 years), 46 to 65 (n=31; 52.8 ± 4.2 years) and 66 to 85 (n=22; 73.9 ± 6.1 years) years old.

Testing sessions were conducted immediately after a complete eye exam of the subject performed by one of the authors (SL). Informed consent was obtained from each observer after the individual or his parent reviewed a letter of information. Every subject had to be at least 10 years old. Visual acuity was restricted to 20/20 or better in each eye as measured with the Snellen chart at 20 feet. Observers with any amount of refractive error were included as long as their refraction showed no more than 1.50 D of anisometropia. The required stereoacuity was 50 arcsec or better as measured with the Randot Stereogram test. Ocular motility, distance phoria, near point phoria and fixation disparity were also carefully tested, but were not restrictive. Subjects had to be exempt of any manifest ocular or neural disease. Special care was taken with regards to the presence of media opacities and the integrity of the macula, subjects with any obvious abnormality were rejected .

Stimuli

The test was presented as a 50% density random-dot stereogram generated by the Matlab PC program and printed on white sheets using a HP 1500L Laserjet color printer. The stereogram was composed of red, green and black dots on a yellow background. Every dot of the stereogram was 0.355 mm wide and subtended about 180 arcsec at the 40cm viewing distance.

The visual stimuli formed by the stereograms were square shape flat planes consisting of 40x40 red, green or black dots subtending 4 square degrees. In order to perceive the stimuli, the observers needed red-green glasses as a means of separating the eyes' points of view. Outside the stereoscopic squares, the stereogram was made of randomly distributed black dots on the yellow background and was thus fully correlated (100%) at zero disparity. The disparity of each square stimulus was randomly made either crossed (in front of the chart plane) or uncrossed (behind the chart plane) and always had an absolute value of 360 arcsec (i.e. two dots of disparity).

The stereogram charts contained six rows of five stereoscopic square stimuli. A total of six charts were made: three "easy" and three "difficult". Each row of stimuli was attributed a constant correlation value. The three easy charts contained, from top row to bottom row, the correlation values of 100%, 90%, 80%, 70%, 60% and 50%. The difficult charts presented correlation values of 60%, 40%, 30%, 25%, 20% and 15%.

Insert Figure 1 about here

Experimental procedure

The testing session occurred in the room where the eye examination took place. Observers were tested in accordance with the Declaration of Helsinki for research involving human subjects. The illumination in the room was normal light condition. The subject wore his best correction for reading distance (40 cm) as determined by the visual exam. He was then asked to put the red-green filters over the prescription eyeglasses.

When ready, the observer was presented with a randomly selected easy chart at 40 cm. The subject was then asked to indicate if he could see the squares on the first row (100% correlation). Some observers needed a few seconds to adapt to the test, but all were able to perceive the stereoscopic squares on the first row. The subject had to

mention for each square if it was perceived as being in front or behind the plane of the chart. The subject gave his answer verbally and didn't get any feedback as to whether his answer was correct or not. In order to proceed to the next row, the subject had to correctly identify four out of the five stimuli. No time limit was set to perform the test and subjects were asked to take the time needed to be sure of their answers before they responded. Threshold was set as the last correlation value at which the observer could correctly perceive a minimum of four stimuli in a row of five. If the entire easy chart was correctly identified, the subject was then presented with the difficult chart and answered in the same fashion. The whole procedure was performed a second time and the average of both results was used for statistics.

Results

Insert Figure 2 about here

The distribution of the binocular correlation threshold of the observers plotted as a function of age can be viewed in figure 2. The average performance threshold in our sample is 31.72% with a standard deviation of 8.48%. We fitted our sample's data with a linear regression function and we obtained a significant positive slope ($n = 100$; %/year \pm SE, 0.14 \pm 0.04; $t_{98} = 3.5$; $p < 0.001$). The correlation between age and stereoscopic IOC is low but significant ($r = 0.33$; $t_{98} = 3.27$; $p < 0.01$) and yields a determination factor of 11%.

When grouped into age categories, the analysis of variance (ANOVA) reveals a significant difference between groups ($F_{(3, 96)} = 3.81$; $p < 0.05$). As can be seen in table 1, individuals in the older age groups have higher thresholds than the observers in the younger age groups. Post hoc t tests with inference correction (Bonferone) showed a significant difference between the 66 to 85 year old group and all the other observers

($t_{98} = 2.46$; $p < 0.01$). We also found a significant decrease in the performance of the 46 to 65 year old group when compared to the younger groups ($t_{76} = 2.54$; $p < 0.01$).

 Insert Table I about here

When females ($n = 64$; $\text{IOC} \pm \text{SD}$, 30.89 ± 6.75) and males ($n = 36$; 33.19 ± 10.85) are grouped separately, the t test shows no significant difference between groups. Also, we found no correlation between near point phorias ($r = 0.07$) or fixation disparity ($r = 0.14$) with interocular correlation. These factors seem to have little link with the stereoscopic IOC threshold in the perception of a static stereoscopic shape for our population.

Further analysis revealed that baseline Randot stereoacuity has a low, but significant, correlation with stereoscopic IOC ($r = 0.44$; $t_{98} = 4.87$; $p < 0.001$). Thus, stereoacuity would account for 19% of the variation of stereoscopic IOC thresholds according to our data. However, our stereoacuity data are restricted by our selection criterion (50 arcsec) and the Randot's finest disparity (20 arcsec). To circumvent this problem, we have recalculated the correlation between stereoacuties and IOC thresholds on a subset of individuals. We eliminated all the subjects that reached 20 arcsec as to avoid a floor effect leaving us with 44 subjects that never reached the limits of the Randot Stereogram test. The new correlation results are almost identical to the ones obtained when all subjects were analysed ($r = 0.43$, $t_{42} = 3.12$; $p < 0.01$). The new calculation reveals that stereoacuity would account for 19% of the variation of stereoscopic IOC thresholds, exactly as the previously calculated value.

We plotted stereoacuity against stereoscopic IOC (figure 3) to illustrate the relationship between both variables. The trend of the relation between variables is represented by the line on the graph ($n = 100$; $\text{arcsec}/\% \pm \text{SE}$, 0.46 ± 0.09 ; $t_{98} = 4.90$; $p < 0.001$).

Insert Figure 3 about here

Furthermore, the ANOVA showed that age (figure 4) affects fine stereoacuity ($F_{(3, 96)} = 6.24$; $p < 0.01$) as measured with the Randot test. Figure 4 shows the distribution of the observers' fine stereoacuity as a function of their age. We fitted the distribution with a linear regression (solid line) and we obtained a significant positive slope similar to the one obtained with stereoscopic IOC as a function of age ($n = 100$; $\text{arcsec/year} \pm \text{SE}$, 0.17 ± 0.04 ; $t_{98} = 4.25$; $p < 0.001$).

The weak but significant correlation between stereoscopic IOC and stereoacuity performances could be the result of aging on both processes independently. To further establish whether there were similar properties between these two variables, we elected to isolate observers that performed poorly on both tasks. The proportion of individuals in our sample with a fine stereoacuity deficit ($p < 0.05$ when compared to their age group) is about 26% ($n = 100$; $95\% \text{IC}_{\pi} = (0.17, 0.35)$). This proportion rises to 56% ($n = 23$; $95\% \text{IC}_{\pi} = (0.35, 0.77)$) when we consider only the subjects with a stereoscopic IOC deficit ($p < 0.05$ when compared to their age group).

Insert Figure 4 about here

So it can be hypothesized that aging affects both stereoacuity and interocular correlation processing without the two involving the same neural operation, although there must be an overlap between mechanisms.

Discussion

Our findings indicate that there is a significant effect of aging on binocular correspondence processing. Older subjects required higher level of interocular correlation to correctly perceive a stereoscopic stimulus. Our results also indicate a small but significant correlation between fine stereoacuity performance and results to our stereoscopic IOC task. Obviously, there must be an overlap between both processes but we cannot conclude from the present results whether the same underlying mechanisms are involved in the small age-related loss on both functions given the different scales used. However, a confidence interval sub-analysis on our data hints at the notion that they should only partially overlap.

One of the studies that more closely resembles ours suggests that there would be no effect of aging on low interocular correlation stereopsis performance. In a stereoscopic shape recognition task, Norman and colleagues found that the decline in performance was remarkably the same for both younger and older groups when they reduced the binocular correlation of their stimuli.¹⁷ However, they used more prominent shapes for the older observers than for the younger observers. Also, their apparatus and methodology were significantly different from ours and they didn't use correlation values inferior to 40%. These differences between both studies can explain the divergence between their conclusion and our results.

The true "normal population" aging effect could even be more important than shown here when we consider that our study is probably biased by the very strict selection of candidates. People who present with ocular problems associated with aging may also have more marked perception processing changes without the two being causally related. It could indicate a faster aging process of all aspects of the visual pathway and of the individual at a larger scale.¹³ Therefore, our inclusion criterion should bias older individuals whose binocular processing is less affected by aging.

One of the factors that would be more likely to modify results to our test is the density of the elements in the stereograms we used. At least one study indicates that efficiency of binocular combination decreases as the density of elements increases in RDS. Thus, 50% RDS would be less than optimal for correlation tasks.¹⁸ The authors of that study suggest that a density of 20% would be more favorable to the performance of the observers, at least for the detection of correlation in a dynamic stimulus. Once again, it would be interesting to observe the effect of this factor in our test apparatus and furthermore, it's effect on aged observers.

With the results of our study, we have more evidence of second order processing age-related loss. Such results have already been found in previous work.¹⁶ For instance, age-related effects have been found for processing symmetry¹⁹, second-order orientation and motion perception¹⁴, interattribute spatial processing²⁰ and decreased capacity for processing human faces in the elderly.²¹ Faubert¹⁶ concluded that perceptual processes that solicit larger neural networks are more affected by aging because of the saturation of alternative routes required in the aging brain to process perceptual input.

The clinical utility of an interocular correlation stereopsis test is still questionable since it's effect was hard to appreciate in a clinical setting due to it's relatively high inter-observer variation. Further investigation needs to be conducted in order to isolate abnormal conditions of the visual pathway that could induce a marked reduction of performance to our test. These conditions could include amblyopia, anisometropia, strabismus or neural diseases like Alzheimer or Parkinson's disease.

Acknowledgement

Supported by Canadian Institutes of Health Research Grant R0010026 (JF).

Table I : IOC data for the 100 subjects divided into age groups.

Age group (years)	n	Correlation (%)	SD (%)	SE (%)
10-25	21	28,81	7,32	1,60
26-45	26	29,04	5,05	0,99
46-65	31	33,23	8,83	1,59
66-85	22	35,55	10,49	2,24
Total	100	31,72	8,48	0,85

Table 1. Number of subjects, IOC results and standard deviation and error for the 100 subjects divided into age groups.

Figure 1 : Examples of stimuli used

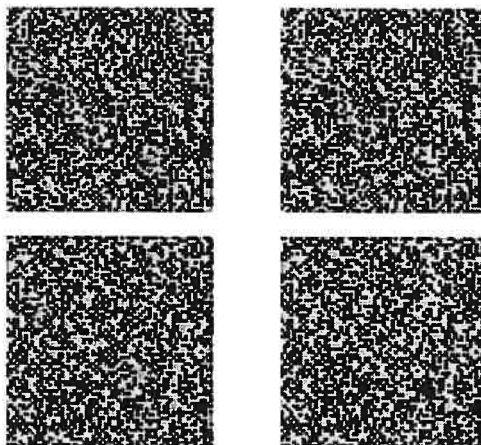


Figure 1. Examples of stimuli used. Top images represent an IOC of 100% crossed disparity square. Bottom elements represent a 50% IOC uncrossed square (uncrossed fusers). The real charts used red-green filters to separate the input for each eye.

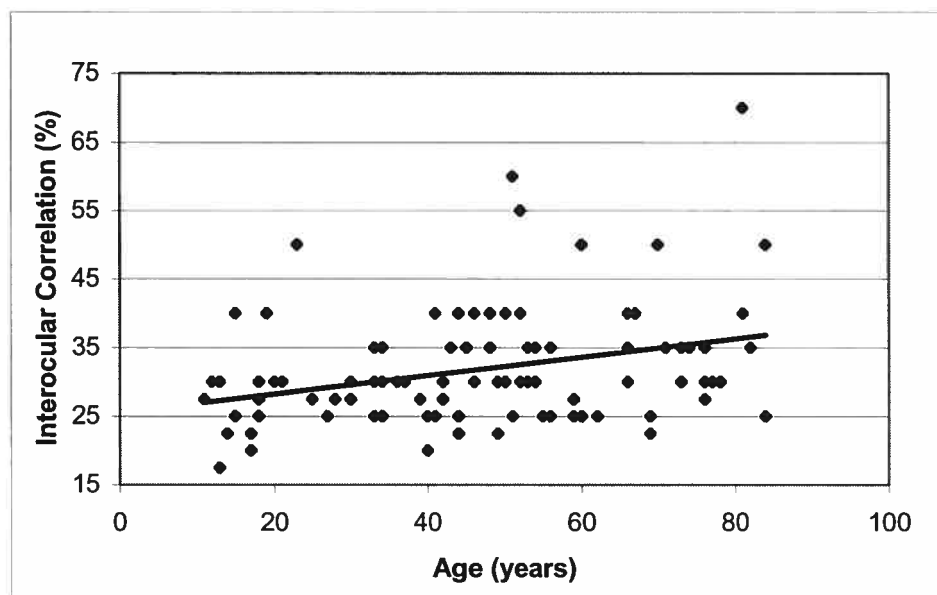
Figure 2 : Interocular correlation as a function of age

Figure 2. The IOC for the 100 subjects plotted against their age. The line represents the trend of the graph.

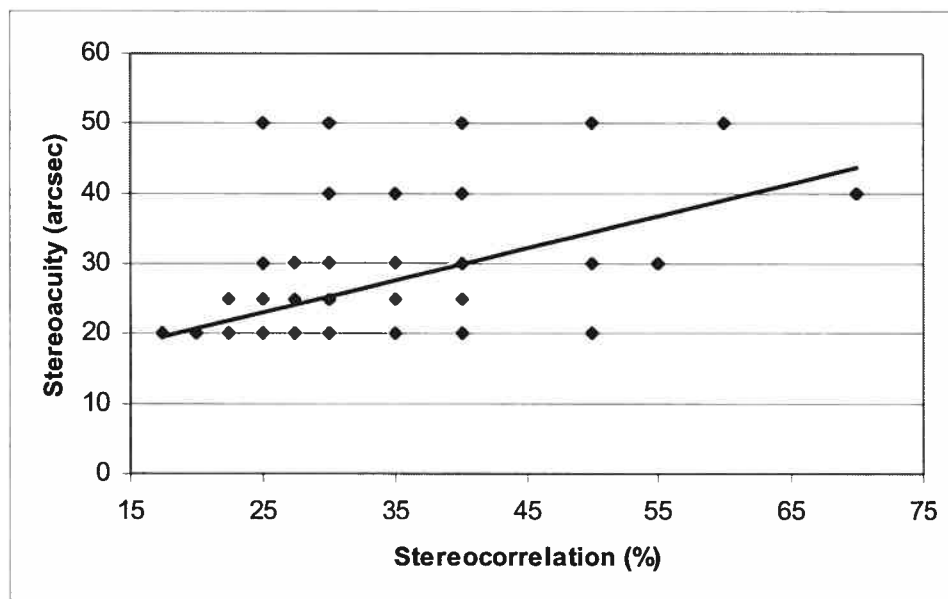
Figure 3 : Stereoacuity as a function of interocular correlation

Figure 3. The Randot stereoacuity for the 100 subjects plotted against their stereoscopic IOC. The line represents the trend of the graph

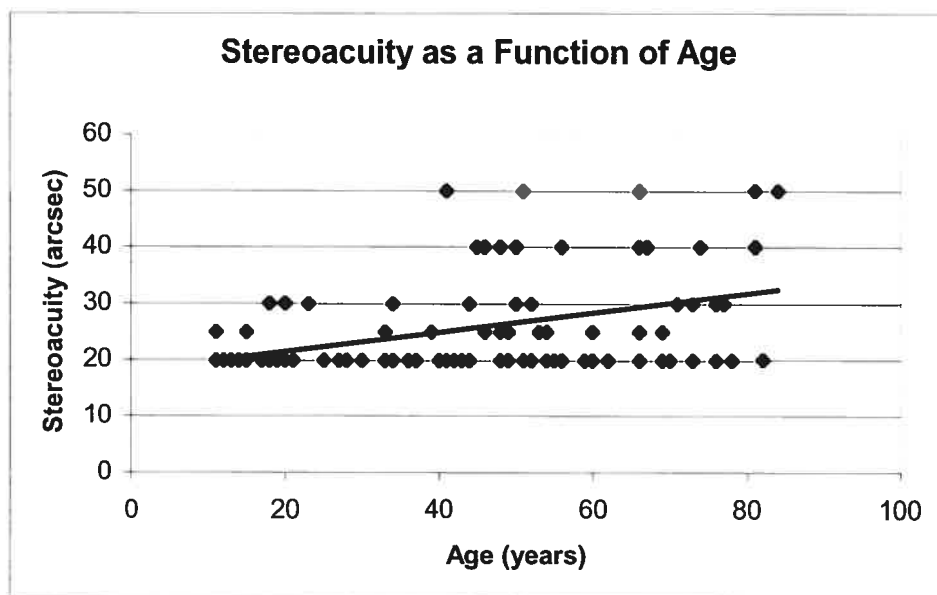
Figure 4 : Stereoacuity as a function of age

Figure 4. The Randot stereoacuity for the 100 subjects plotted against their age. The line represents the trend of the graph.

References

1. Muller, C., Lankheet, M. J. M., van de Grind, W. A. Binocular correlation does not improve coherence detection for fronto-parallel motion. *Vision Research* 2004; 44: 1961-1969.
2. Harris, J. M., Parker, A. J. Constraints on human stereo dot matching. *Vision Research* 1994; 34: 2761-2772.
3. Cormack, L. K., Riddle, R. B. Binocular correlation detection with oriented dynamic random-line stereograms. *Vision Research* 1996; 36: 2303-2310.
4. Julesz, B. *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago, IL, USA: University of Chicago Press, 1971.
5. Gheorghiu, E., Erkelens, C. J. Spatial-scale interaction in human stereoscopic vision in response to sustained and transient stimuli. *Vision Research* 2004; 44: 563-575.
6. Cormack, L. K., Stevenson, S. B., Schor, C. M. Interocular correlation, luminance contrast and cyclopean processing. *Vision Research* 1991; 31: 2195-2207.
7. Tyler, C. W., Julesz, B. Binocular cross-correlation in time and space. *Vision Research* 1978; 18: 101-105.
8. Zaroff, C. M., Knutelska, M., Frumkes, T. E. Variation in stereoacuity: Normative description, fixation disparity, and the roles of aging and gender. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 2003; 44: 891-900.
9. Spear, P. D. (1993). Neural bases of visual deficits during aging. *Vision Research* 1993; 33: 2589-2609.
10. Wright, L. A., Wormald R. P. Stereopsis and ageing. *Eye* 1992; 6: 473-476.
11. Brown, B., Yap, M. K., Fan, W. C. Decrease in stereoacuity in the seventh decade of life. *Ophthalmic and Physiological Optics* 1993; 13: 138-142
12. Haegerstrom-Portnoy, G., Schneck, M. E., Brabyn, J. A. Seeing into old age: vision function beyond acuity. *Optometry and vision science* 1999; 76: 141-158.

13. Schneck, M. E., Haegerstrom-Portnoy, G., Lott, L. A., Brabyn, J. A. Ocular contributions to age-related loss in coarse stereopsis. *Optometry and vision science* 2000; 77: 531-536.
14. Habak, C., Faubert, J. Larger effect of aging on the perception of higher-order stimuli. *Vision Research* 2000; 40: 943-950.
15. Smith, A. T., Greenlee, M. W., Singh K. D., Kraemer, F. M., Henning, J. The processing of first- and second-order motion in human visual cortex assessed by functional magnetic resonance imaging (fMRI). *Journal of Neuroscience* 1998; 18: 3816-3830.
16. Faubert, J. Visual perception and aging. *Canadian Journal of Experimental psychology* 2002; 56: 164-176.
17. Norman, J. F., Dawson, T. E., Butler, A. K. The effects of age upon the perception of depth and 3-D shape from differential motion and binocular disparity. *Perception* 2000; 29: 1335-1359.
18. Cormack, L. K., Landers, D. D., Ramakrishnan, S. Element density and the efficiency of binocular matching. *Journal of the Optical Society of America* 1997; 14: 723-730.
19. Herbert, A.M., Overbury, O., Singh, J., Faubert, J. Aging and bilateral symmetry detection. *Journal of Gerontology B: Psychological Sciences* 2002 ; 57: P241-P245.
20. Faubert, J. & Bellefeuille, A. Effects of aging on intra- and inter-attribute spatial frequency information for luminance, color, and working memory. *Vision Research* 2002; 42: 369-378.
21. Boutet, I. & Faubert, J. Recognition of faces and complex objects in younger and older adults. *Memory & Cognition* 2005 (In press).

Chapitre IV

ARTICLE 2

Dissociation between shape and stereoscopic processing in random-dot
stereograms for patients with mild sensory deficits

Stéphane Laframboise, OD

Danielle De Guise, OD, M.Sc.

Jocelyn Faubert, Ph.D.

ACCORD DES COAUTEURS

Déclaration des coauteurs de l'article 2 du mémoire

1. Identification de l'étudiant et du programme

Stéphane Laframboise [REDACTED]

M.Sc. : Maîtrise en sciences de la vision

2. Description de l'article

Auteurs : Stéphane Laframboise OD, Danielle De Guise OD M.Sc., Jocelyn Faubert Ph.D.

Titre : Dissociation between shape and stereoscopic processing in random-dot stereograms for patients with mild sensory deficits.

Revue : Cet article a été soumis pour publication à la revue *Optometry and Vision Science (OVS)*

3. Déclaration de tous les coauteurs autres que l'étudiant

À titre de coauteur de l'article identifié ci-dessus, je suis d'accord pour que Stéphane Laframboise inclue cet article dans son mémoire de maîtrise qui a pour titre : « *Mesure de cohérence stéréoscopique : effet du vieillissement et du microstrabisme* ».

Jocelyn Faubert

Coauteur

Signature

Date

Danielle De Guise

Coauteure

Signature

Date

Abstract

Purpose This study was designed to evaluate the effect of mild binocular sensory deficits on the minimum interocular correlation (IOC) needed by the visual system to correctly perceive a static stereoscopic stimulus.

Methods Stereoscopic IOC threshold was determined in 9 observers (average age \pm SD, 34 ± 14.4 years) between the ages of 12 and 52 with microstrabismus and/or anisometropic amblyopia selected from a clinical population. We used partially correlated red-green random-dot stereograms (RDS) displaying flat square surfaces at a disparity of ± 360 arcsec.

Results This group of observers needed a higher binocular correlation to perceive the stereoscopic stimuli when compared to the normal group. However, all observers were able to perceive depth in our stimuli even if they could not see the shapes contained in the Randot global stereotest. In our sample, the poorest performances seem to be attributed to the observers with the most severe amblyopia, but this observation is not statistically demonstrated given low sample size.

Conclusions We conclude that there is a dissociation between shape and depth perception processing in RDS stimuli. Microstrabismic patients may mainly lack the shape recognition ability while amblyopic patients could have more difficulty in the perception of depth in partially correlated RDS. We also point at the importance of asking the shapes perceived in RDS stereotests (e.g. Randot) and not only the presence or absence of a stimulus to have a better appreciation of the perceptual consequences of different visual conditions.

Keywords

Interocular correlation, stereopsis, random-dot stereogram, amblyopia, microstrabismus

Introduction

Clinical stereopsis testing is often performed for the detection of visual processing deficits as opposed to understanding what the patient sees. Stereo acuity is considered a bench mark of binocular vision processing as a whole given that it rests at the top of the binocular processing hierarchy. Uncorrected refractive error, decreased visual acuity, sensory and motor fusion problems are all conditions inclined to reduce stereoscopic abilities. Thus, patients with normal stereopsis are unlikely to have any serious refractive or binocular problems.¹

Clinicians can actually benefit from many stereotests offering different characteristics and thus assessing different aspects of stereopsis. The most widely used tests are designed to assess fine/local stereopsis and global stereopsis. Fine stereopsis is characterized by high frequency stimuli and small disparities. On the other hand, low frequency images and large disparities stimulates the coarse stereoscopic channels of binocular vision processing. Local stereopsis (or contour stereopsis) is defined by the horizontal disparity of monocularly visible objects or patterns (like the ring portion of the Titmus or Randot tests). This is to be contrasted with global stereopsis which is brought about by horizontal disparity patterns that are monocularly invisible like random-dot stereograms (RDS, such as the Randot shape recognition test).² Although local and global stereopsis mechanisms share some similarities, important differences in the underlying physiology exists. It is usually considered that a person performing well on a global test will perform well on a local test, but the reverse is not necessarily true.¹

Strabismus and amblyopia detection are usually a major concern when assessing a patient's vision, especially in the children population. Strabismus is characterised by the inability of the motor fusion mechanism to maintain ocular alignment. This situation will cause a deviation of the affected eye and loss of fusion and stereopsis. Amblyopia is a loss of best-corrected visual acuity in one eye that is not caused by an organic condition. Amblyopia often results from strabismus or monocular image deprivation (e.g. anisometropia) appearing in the first years of life, it may also lead to

clinically evident loss of stereopsis. It is important to identify these visual abnormalities as early as possible since treatment is more successful when it is applied in the first years of life. Usually, these conditions will be easily assessed by the clinician since the motor or sensory deficits are quite obvious.

However, some cases demonstrate a very small angle of strabismus, little amblyopia and normal fusion amplitude upon clinical testing. This form of strabismus with very small angles of deviation and mildly reduced degrees of binocularity has been classified as microstrabismus.³ It is defined as a manifest deviation of less than 9 prism diopters in which a foveal suppression scotoma, normal peripheral motor fusion, and reduced stereoacuity are found. In addition, mild amblyopia, harmonious anomalous retinal correspondence (giving rise to abnormal binocular single vision), and unocular eccentric fixation are often present. There is also a close association with anisometropia.^{4,5} Generally, studies have demonstrated a reduction of the sensory processes that was relatively larger than the motor deficits for these patients.⁶ Thus it seems likely that the characteristics of microstrabismus are a consequence of abnormal visual experience, instead of a motor problem as expected in larger angle strabismus.

Microstrabismus isn't always clinically detected since the deviation is subtle and the sensory deficits are mild. Reduced stereopsis is an invariable finding in microtropia when contour stereotests are used, but the measured stereo acuity can be superior to the pass or fail criterion of certain tests. On the other hand, almost all microstrabismic patients demonstrate a loss of stereopsis with random-dot stereogram tests.^{6,7}

The impaired stereo processing found with microstrabismic patients is thought to be caused by the suppression area observed in these subjects. This suppression area, which would likely result from an abnormal sensory experience, causes a scotoma that always includes the central retina, which is in turn responsible for the best stereoscopic acuity.⁸

Random-dot stereograms are very useful tools to study binocular depth perception in humans since it doesn't provide any monocular cues and depends only on binocular

disparity. Perception of 3-D surface shape in these stimuli is also an important property of stereopsis and many tests already use this feature (Randot, TNO, Lang, etc.). Perception of depth and shape in these stereograms is possible only if the level of interocular correlation (IOC) is above a certain threshold.^{2,9} The IOC can be defined as the percentage of intentionally matching dots between both parts of the stereogram when the remainder are randomly distributed. Thus, a fully correlated stereogram (100%) leaves no place for random noise whereas purely random half-images would give a correlation of 0%. In the case of a 50% density stereogram (half black dots and half white dots), if we identically place half the dot elements in both images and leave the remainder to be randomly positioned, we would obtain a correlation value of 50%. Every clinical tests actually available use fully correlated images (100%), but there are no commercially available clinical test that assess the minimum level of IOC necessary to perceive depth in a RDS.

The literature is still scarce about interocular correlation and the results vary greatly depending on the parameters used for the different experiments. In a previous paper, we reported an average IOC threshold of 31.7% and a standard deviation of 8.5% obtained for the perception of depth in partially correlated stereograms with a sample of 100 untrained normal subjects using a static display.¹⁰ We also observed that aging mildly affected the observers performance to our test. Performance to such a test primarily relies on second-order processing. In the present study, we measured performance of subjects affected by microstrabismus and/or anisometropic amblyopia to the same test.

Materials and Methods

Subjects

A total of 9 subjects diagnosed with microstrabismus and/or anisometropic amblyopia were recruited in an optometric clinical population. Microstrabismus was assessed

following the observation of a mild amblyopia and/or poor stereopsis (particularly global stereopsis) with the help of the Bagolini striated lenses and/or the 4 diopters base-out (or base-in) prism test to discover the presence of a central suppression area. Cover test was also performed to identify a small observable deviation of the affected eye (less than 9 prism diopters), which was not always present.

Presence of an eccentric fixation observable with the direct ophthalmoscope was also assessed. Of course, the refraction was carefully performed. If a mild amblyopia and/or loss of stereopsis was present along with an anisometry of at least 1.50 diopters, we recruited the subject as an anisometric amblyope. Our sample is made of two anisometric amblyopes, six microstrabismic patients and one subject who presented with characteristics of both conditions. None of these patients reported surgical or patch treatment in the past, except for subject #7 who acquired microstrabismus consequently to a large angle strabismus surgery around age six followed by patch treatment.

Informed consent was obtained from each observer after the individual or his or her parent reviewed a letter of information. Every subject had to be at least 10 years old. Observers with any amount of refractive error were included and visual acuity was not restrictive. The required fine stereoacuity was 70 arcsec or better as measured with the Randot stereoacuity test, which is the passing criterion mentioned in the instructions given with the test. Global stereopsis was also measured with the Randot shape recognition task, but it was not a selection criterion. We asked the patients to identify the shapes in the RDS and not only the empty squares as suggested by the instructions given with the test and certain authors.¹¹ Subjects had to be exempt of any manifest ocular or neural condition other than amblyopia and strabismus. Special care was taken with regards to the presence of media opacities and the integrity of the macula, subjects with any obvious abnormality were rejected .

Stimuli

The test was presented as a 50% density random-dot stereogram generated by a Matlab PC program and printed on white sheets using a HP 1500L Laserjet color printer. The stereogram was composed of red, green and black dots on a yellow background. Every dot of the stereogram was 0.355 mm wide and subtended about 180 arcsec at the 40cm viewing distance.

The visual stimuli formed by the stereograms were square shape flat planes consisting of 40x40 red, green or black dots. Each square subtended 4 square degrees. In order to perceive the stimuli, the observers needed red-green glasses as a means of separating the eyes' points of view. Outside the stereoscopic squares, the stereogram was made of randomly distributed black dots on the yellow background and was thus fully correlated (100%) at zero disparity. The disparity of each square stimulus was randomly made either crossed (in front of the chart plane) or uncrossed (behind the chart plane) and always had an absolute value of 360 arcsec (i.e. two dots of disparity).

The stereogram charts contained six rows of five stereoscopic square stimuli. A total of six charts were made: three "easy" and three "difficult". Each row of stimuli was given a constant correlation value. The three easy charts contained, from top row to bottom row, the correlation values of 100%, 90%, 80%, 70%, 60% and 50%. The difficult charts presented correlation values of 60%, 40%, 30%, 25%, 20% and 15%.

Insert Figure 1 about here

Experimental procedure

The testing session occurred in a standard optometric examination room. Observers were tested in accordance with the Declaration of Helsinki for research involving human subjects. The illumination in the room was normal light condition. The subject

wore his or her best correction for reading distance (40 cm). He or she was then asked to put the red-green filters over the prescription eyeglasses.

When ready, the observer was presented with a randomly selected easy chart at 40 cm. The subject was then asked to indicate if he or she could see the squares on the first row (100% correlation). Some observers needed a few seconds to adapt to the test, but all were able to perceive the stereoscopic shapes on the first row. The subject had to mention for each square if it was perceived as being in front or behind the plane of the chart. The subject gave his or her answer verbally and didn't get any feedback as to whether his or her answer was correct or not. In order to proceed to the next row, the subject had to correctly identify four out of the five stimuli. No time limit was set to perform the test and the subject was asked to be sure of his or her answers before responding. Threshold was set as the last correlation value at which the observer could correctly perceive a minimum of four stimuli in a row of five. If the entire easy chart was correctly identified, the subject was then presented with a difficult chart and answered in the same fashion. The whole procedure was performed a second time with different charts and the average of both results was used for statistics.

Results

Insert Table 1 about here

The details of the clinical findings and stereoscopic IOC results for the nine subjects are shown in Table 1. All subjects were able to perceive depth from our stimuli, at least in the easy charts (IOC 50% and above). Even the five subjects who were not able to discriminate shape in the Randot global stereopsis test perceived the disparity correctly for the higher IOC stimuli. However, it is interesting to note that some

observers mentioned they could not see the shape (square) of the stimuli, but the sensation of depth was nonetheless easily seen by all for the higher correlation stimuli.

When we performed a t test comparison with the present results and our previously obtained normal population results ($n = 100$; $\text{IOC} \pm \text{SD}$; 31.7 ± 8.5)¹⁰, we found that this group of patients shows a statistically significant deficit in stereoscopic IOC performance ($n = 9$; 39.7 ± 7.9 ; $p < 0.01$). On an individual basis, subjects 1, 2, 5 and 8 are the only patients who demonstrate a significant deficit when compared to their respective age groups ($p < 0.05$). We can consider that these four subjects statistically failed the stereoscopic IOC test. Oddly enough, three of these four subjects were able to perceive shapes in the Randot global stereo test.

The four subjects who failed the stereoscopic IOC task also have the lowest affected eye visual acuity of our sample (6/9 for the four of them). Only subject 9 also presented with a visual acuity of 6/9 and demonstrated normal performance for the stereoscopic IOC discrimination task. Figure 2 shows the stereoscopic IOC performance as a function of the snellen visual acuity of the affected eye. Even though our sample is small, amblyopia seems to have a negative effect on stereoscopic IOC discrimination. Qualitative analysis of these datas indicate a trend towards poorer results for the subjects with the most severe amblyopia in our sample. However, we fitted our sample's data with a linear regression function and we obtained a non significant slope ($n = 9$; $\%/\text{VA} \pm \text{SE}$, 3.33 ± 2.45 ; $t_7 = 1.36$; $p > 0.1$). The correlation between visual acuity and stereoscopic IOC is low and also not statistically significant ($r = 0.32$; $t_7 = 1.36$; $p > 0.1$).

Insert Figure 2 about here

Further observation of the results revealed that all the patients who had a central scotoma upon clinical testing were unable to discriminate the shapes with the Randot

global stereotest. The results from this subgroup of patients to the stereoscopic IOC test ($n = 5$; 39.5 ± 10.7) were nonetheless almost equal to the results obtained by the entire group of abnormal patients. Thus, there is no correlation between results obtained to the standard Randot global stereotest and the results to our stereoscopic IOC test in this sample.

Discussion and conclusion

A dissociation between depth and shape perception in random-dot stereograms can certainly be concluded from our results and the comments obtained from our observers. It has been reported that patients with microstrabismus rarely perceive shape in random-dot stereograms.^{5,6,12} Interestingly, we found that these patients seem to be able to extract depth information from a RDS even under relatively low interocular correlation.

Harwerth and Fredenburg reported equal performance between local and global stereopsis for some microstrabismic subjects.⁵ These authors used larger stimuli and wider dots in their RDS (6.7×6.7 arcmin) than what is used in standard clinical tests. They suggested that size of the stereograms and dot elements is probably a major factor influencing performance to these tests. The finer elements of the conventional RDS tests would be too hard to correlate and would not permit peripheral fusion for patients with microstrabismus.⁵ While we also used wider dot elements in our stereoscopic IOC task than the dots used in the Randot stereotest, they were much smaller (3×3 arcmin) than the ones used by Harwerth and Fredenburg. Furthermore, some of our observers reported being unable to discriminate the shape of our stimuli while being able to perceive its depth. Thus, we don't believe that poor performance from microstrabismic patients on stereoscopic shape recognition task in RDS and/or better performance in our stereoscopic IOC test are entirely attributable to element size. Another difference common to our procedure and the procedure of Harwerth and Fredenburg when compared to the standard stereotests resides in the task. In both

procedures, the task was to discriminate if the stimulus was nearer or farther compared to a reference plane.

Our findings may be explained by the second-order processes involved for the perception of our stimuli. In our stimuli, as we lower the IOC, the linear information also decreases and the visual system has to rely more and more on the non-linear information. We hypothesize that microstrabismic patients are inefficient in using first-order information contained in the Randot RDS shape recognition test but could still use second-order information to judge the depth of stimuli. This situation could result from the central suppression scotoma masking the finer first-order details of the RDS. Therefore, these patients couldn't perform an adequate dot by dot matching and this could influence the perception of the shapes that may require intact first-order information contained in a RDS. They could however use the second-order information to perceive the presence of the stereo shape contained in the stimulus since this processing involves coarser level of information and could be less affected by the suppression scotoma.

Some similar results concerning second-order stereoscopic stimuli have already been reported by Ziegler and Hess.¹³ They reported that none of their observers could perceive stereoscopic shape from a non-linear stimuli whereas linear stimuli yielded the percept of a 3-D surface shape. This supports the hypothesis that first-order processing is required to clearly perceive shape from a RDS. However, second-order processing could give the percept of depth in a near/far judgement task. This suggests a dissociation between seeing stereoscopic surface shape and depth. Second-order processing, in general, seems to occur at larger scales and would be more appropriate to detect the global disparities of objects or surfaces. The coarse-scale disparity signal given by the non-linear mechanism is thought to contribute to guide the finer matches involving linear processing.¹⁴

A previous report indicated that many people who performed weakly with clinical stereotests could nonetheless extract non-linear (second-order) disparity information.¹⁵ This finding also supports the theory that second-order processing could be more

robust to certain conditions, like microstrabismus, and would permit a certain degree of depth appreciation to these patients. We should, therefore, always ask the patients to report the shapes seen in the RDS tests and not only the empty squares as we could miss some important information about our patient's visual system.

The clinicians in our group have often observed that microstrabismic patients could often identify the empty squares in the Randot global stereotest without being able to perceive the shapes contained in the other squares. This clinical observation is reinforced by the results obtained in the present study. Thus, the instructions given with the Randot test suggesting that identification of the empty squares is enough for a pass doesn't necessarily tell us the entire story, especially for microstrabismic patients.

Although our conclusions are limited by our small sample size, we suspect that more profound amblyopia would have a deleterious effect on stereoscopic IOC performance. The trend of our sample indicates that amblyopia seems to affect performance to a greater extent in stereoscopic IOC task than in RDS shape recognition task.

The observation of poor second-order task performance for patients with amblyopia has already been reported in the literature.^{16,17} These investigations demonstrated that second-order loss was greater than first-order loss in a detection task for amblyopic eyes when compared to normal control subjects. This finding suggests a deficit specific to the second-order mechanism involving a greater neural loss in amblyopia than the first-order loss known to occur in V1. There is also an apparent loss of performance for the non-amblyopic eye of amblyopic patients when tested for second-order detection compared to normal subjects, which would be evidence of a binocular component of the second-order deficit. Obviously, a lower binocular function capacity would greatly affect a binocular correlation task.

Further investigation will be needed to demonstrate the true relationship between microstrabismus, amblyopia and stereoscopic IOC performance. However, we believe that a stereoscopic IOC test would be helpful in the evaluation of these conditions and the efficiency of their treatment, especially for the children population.

Table I : Visual characteristics of the 9 subjects

Subj.	Age	Sex	Eye	Refraction	Visual Acuity	Central Scotoma	Cover Test	Foveal Fixation	Anomaly	Randot stereotest		Stereo IOC
	Years									Contour Arcsec	Global Arcsec	%
1	36	m	OD	-1,00	6/4,5	None	-	C	-	25	500	40
			OS	-0,75	6/9	None	Et	C	M			
2	29	f	OD	+3,25-6,25x170	6/9	None	-	C	AA	20	250	40
			OS	-0,25-0,75x050	6/6	None	-	C	-			
3	22	f	OD	-0,75	6/4,5	None	-	C	-	20	250	35
			OS	+0,75	6/7,5	None	-	C	AA			
4	52	m	OD	+1,75	6/7,5	Present	-	E	M	40	None	27,5
			OS	+1,25	6/6	None	-	C	-			
5	31	f	OD	pl -0,50x165	6/6	None	-	C	-	30	250	45
			OS	pl -1,00x005	6/9	None	Xt	C	M			
6	50	m	OD	+0,25	6/7,5	Present	-	E	M	50	None	45
			OS	pl	6/4,5	None	-	C	-			
7	23	f	OD	+1,25-0,25x015	6/6	Present	Et	C	M	40	None	35
			OS	+1,25-0,50x180	6/4,5	None	-	C	-			
8	12	f	OD	+3,25-2,00x175	6/6	None	-	C	-	50	None	55
			OS	+3,75-1,25x010	6/9	Present	-	E	M			
9	51	f	OD	+3,50-0,50x035	6/6	None	-	C	-	60	None	35
			OS	+5,50-1,50x165	6/9	Present	-	E	M+AA			

Table 1 : Visual characteristics of abnormal subjects. OD = right eye ; OS = left eye ; Et = esotropia ; Xt = exotropia ; C = central ; E = eccentric ; AA = anisometropic amblyopia ; M = microstrabismus. Bold IOC results are from the subjects who have significantly reduced IOC results when compared to their respective age group ($p < 0.05$)

Figure 1 : Examples of stimuli used

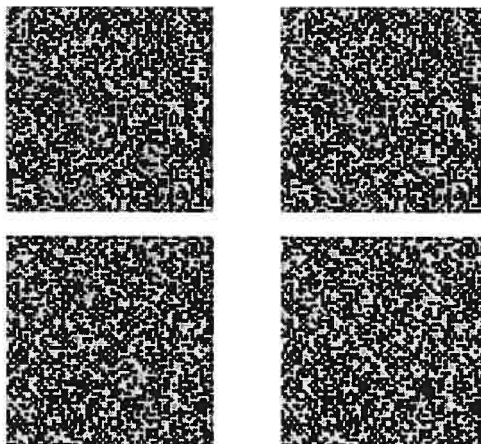


Figure 1. Examples of stimuli used. Top images represent an IOC of 100% crossed disparity square. Bottom elements represent a 50% IOC uncrossed square (uncrossed fusers). The real charts used red-green filters to separate the input for each eye.

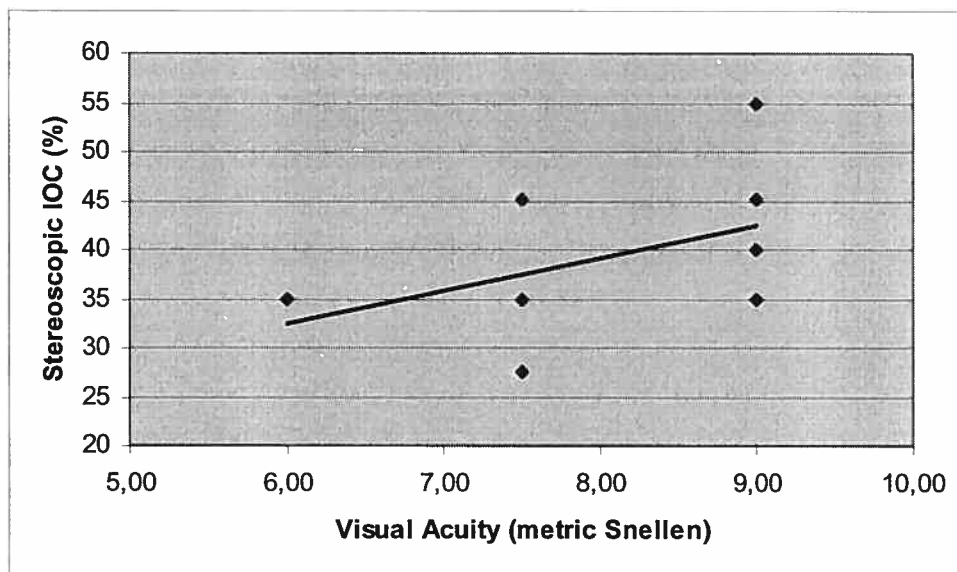
Figure 2 : Interocular correlation as a function of visual acuity

Figure 2. The IOC results for the 9 subjects plotted against their visual acuity. The line represents the trend of the graph.

References

- ¹ Saladin JJ. Stereopsis From a Performance Perspective. *Optom Vis Sci* 2005; 82: 186-205.
- ² Julesz, B. *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago, IL, USA: University of Chicago Press, 1971.
- ³ Von Noorden GK. *Binocular Vision and Ocular Motility: Theory and Management of Strabismus*. 5th ed. St. Louis: Mosby; 1996.
- ⁴ Houston CA, Cleary M, Dutton GN, McFadzean RM. Clinical characteristics of microtropia-is microtropia a fixed phenomenon? *Br J Ophthalmol* 1998; 82: 219-224.
- ⁵ Harwerth RS, Fredenburg PM. Binocular vision with Primary Microstrabismus. *Invest Ophthalmol and vis Sci* 2003; 44: 4293-4306.
- ⁶ Lang J. Anomalous retinal correspondence update. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 1988; 226: 137-140.
- ⁷ Lovasik JV, Szymkiw M. Effects of aniseikonia, anisometropia, accommodation, retinal illuminance, and pupil size on stereopsis. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1985; 26: 741-50.
- ⁸ Saladin JJ, Carr LW. Fusion lock diameter and the forced vergence fixation disparity curve. *Am J optom Physiol Opt* 1983; 60: 933-43.
- ⁹ Gheorghiu E, Erkelens CJ. Spatial-scale interaction in human stereoscopic vision in response to sustained and transient stimuli. *Vis Research* 2004; 44: 563-75
- ¹⁰ Laframboise S, De Guise D, Faubert J. Effect of Aging on Stereoscopic Interocular Correlation. *Optom Vis Sci*. Under Press (2006).
- ¹¹ Ohlsson J, Villarreal G, Abrahamsson M, et al. Screening merits of the Lang II, Frisby, Randot, Titmus, and TNO stereo tests. *J of Am Ass for Ped Ophthalmol and Strab* 2001; Oct: 316-322.
- ¹² Rutstein RP, Corliss DA. BVAT Distance vs. Near Stereopsis Screening of Strabismus, Strabismic Amblyopia and Refractive Amblyopia; A Prospective Study of 68 Patients. *Binocular Vision & Strabismus Quarterly* 2000; 15: 229-236.
- ¹³ Ziegler LR, Hess RF. Stereoscopic depth but not shape perception from second-order stimuli. *Vis Research* 1999; 39: 1491-1507.

-
- ¹⁴ Wilcox LM, Hess RF. scale Selection for Second-order (Non-linear) Stereopsis. *Vis research* 1997; 37: 2981-2992.
- ¹⁵ McColl SL, Ziegler L, Hess RF. Stereodeficient subjects demonstrate non-linear stereopsis. *Vis Research* 2000; 40: 1167-77.
- ¹⁶ Wong EH, Levi DM, McGraw PV. Is second-order loss in amblyopia explained by the loss of first-order spatial input? *Vis Research* 2001; 41: 2951-2960.
- ¹⁷ Wong EH, Levi DM, McGraw PV. Spatial interactions reveal inhibitory cortical networks in human amblyopia. *Vis Research* 2005; 45: 2810-2819.

DISCUSSION GÉNÉRALE DES RÉSULTATS

Les résultats ont été examinés en détail dans chacun des articles. Le but de cette discussion est de résumer les découvertes principales de ces deux études.

L'objectif de cette étude était de mettre à l'épreuve un nouveau test de cohérence binoculaire stéréoscopique et d'évaluer sa pertinence dans le cadre d'une utilisation clinique.

Dans le premier article, nous avons évalué la performance d'une population normale au test sous observation. Nous avons également porté une attention particulière à l'effet du vieillissement sur cette performance. De plus, la corrélation entre les résultats obtenus à ce test et certaines autres données cliniques et individuelles comme le sexe, la disparité de fixation, la phorie de près et l'acuité stéréoscopique Randot a été examinée. Nos résultats ont démontré une certaine robustesse du système visuel à la décorrélacion, en accord avec ce que Julesz avait déjà mentionné (Julesz, 1971). Nous avons observé que les sujets normaux peuvent tolérer une corrélation aussi basse qu'environ 30% (31,7% de moyenne dans notre étude) pour la perception d'un stimulus stéréoscopique dans un stéréogramme à points aléatoires. Malgré une variation assez importante entre les sujets, nous avons également pu constater une diminution statistiquement significative de la performance à ce nouveau test causée par le vieillissement, particulièrement après l'âge de 65 ans. Cette baisse de performance est compatible avec les études démontrant que le vieillissement affecte la perception des stimuli les plus complexes (Faubert, 2002).

La corrélation entre la performance à notre test et d'autres facteurs a également été examinée. Nous avons ainsi conclu que le sexe, la disparité de fixation et la phorie au près n'ont pas de lien avec la perception des stimuli présentés par notre test. Par contre, il existe une certaine corrélation avec l'acuité stéréoscopique de contour

mesurée à l'aide du test Randot. Nous avons également observé que le vieillissement semble affecter l'acuité stéréoscopique d'une amplitude similaire à ce qu'on retrouve pour le test stéréoscopique de corrélation inter-oculaire. Il semble logique qu'il y ait une certaine coïncidence entre les mécanismes sollicités par les deux types de stimuli, mais il est encore très difficile d'évaluer dans quelles proportions.

Le deuxième article traitait de l'influence de certains troubles mineurs de la vision binoculaire comme l'amblyopie anisométrique légère et le microstrabisme sur les résultats obtenus à notre test. Nous avons ainsi remarqué une baisse statistiquement significative de performance de l'ensemble des sujets anormaux comparativement à l'échantillon normal étudié dans le premier article. Les sujets microstrabiques ne semblaient pas être les plus pénalisés par leur condition pour la détection de la profondeur d'un stimulus dans les stéréogrammes décorrés. Ils sont pourtant souvent incapables de percevoir la forme d'un stimulus dans les stéréogrammes à points aléatoires, même parfaitement corrélés. Nous avons également observé une tendance vers une perte de performance plus importante pour les sujets les plus amblyopes face à notre test, même s'ils percevaient plus facilement les formes dans les stéréogrammes conventionnels. Cette observation serait en accord avec les démonstrations indiquant une baisse plus marquée des aptitudes de deuxième ordre chez les sujets amblyopes (Wong, 2001). Suite à ces observations, nous pouvons déduire qu'il existe des mécanismes distincts de stéréoscopie globale pour la perception de la profondeur et de la forme. Il semblerait également que certaines conditions affectent plus la perception de la forme alors que d'autres affectent plus la perception de la profondeur. Il faudrait toutefois poursuivre ces observations et recruter un plus grand nombre de sujets pour confirmer les tendances que nous avons observées puisque le petit nombre de sujets de notre étude ne permettait pas de confirmation statistique.

La constatation de la dissociation entre la perception de la forme et de la profondeur dans les stéréogrammes à points aléatoires, nous indique que les tests de stéréoscopie globale (e.g. les formes du test Randot) sont susceptibles d'être mal utilisés par les cliniciens. Demander au patient d'identifier seulement le rectangle où il n'y a pas de

stimulus, comme il est suggéré dans les instructions du test Randot, peut mener le clinicien à manquer certaines conditions comme le microstrabisme.

CONCLUSION

En général, nous pouvons conclure que le système visuel présente une certaine robustesse à la décorrélation d'un stimulus stéréoscopique, mais que le vieillissement tend à réduire cette capacité. Certaines anomalies du système visuel binoculaire peuvent également diminuer la performance dans de telles conditions. L'amblyopie serait susceptible d'affecter particulièrement cette performance, mais de plus amples recherches seront nécessaires pour définir cet effet.

Suite à cette étude, nous pouvons conclure que ce nouveau test de corrélation interoculaire stéréoscopique serait applicable et pertinent dans un environnement clinique. Il semblerait particulièrement sensible pour la détection de l'amblyopie anisométrique, bien que des recherches additionnelles soient nécessaires pour confirmer cette observation. Par contre, il faut noter une variation des résultats assez importante entre les sujets, même chez les normaux, qui peut rendre l'interprétation clinique de ce test un peu plus délicate.

La révision des paramètres employés pour le test pourrait également s'avérer bénéfique à son utilité clinique. Le choix de points plus petits pourrait rendre le test plus sensible à certaines conditions. Aussi, l'utilisation de plusieurs formes géométriques différentes devant être identifiées, en plus de leur disparité relative, pourrait permettre un meilleur dépistage des sujets microstrabiques chez qui la perception de la forme semble plus affectée que la perception de la profondeur dans les stéréogrammes à points aléatoires.

Dans le but de rendre ce test plus pratique d'un point de vue clinique, il serait souhaitable d'utiliser un seul format de charte. Considérant que très peu de sujets ont éprouvé des difficultés pour les niveaux de cohérence les plus élevés, un écart de corrélation plus important entre ces niveaux pourrait être envisageable. D'un autre

côté, la moyenne des sujets normaux se situant entre 30% et 40%, l'ajout de la valeur de corrélation de 35% pourrait bénéficier à la précision du test. Enfin, aucun des cent sujets normaux n'a réussi à identifier correctement deux fois les stimuli ayant 15% de corrélation, ce qui rend cette valeur de cohérence peu utile. Ainsi, les valeurs de corrélation utilisées dans un test clinique pourraient être les suivantes : 100%, 80%, 60%, 50%, 40%, 35%, 30%, 25% et 20%.

BIBLIOGRAPHIE

Barlow HB, Blakemore C, Pettigrew JD. The neural mechanism of binocular depth discrimination. *J. Physiol.* 1967; 193(2): 327-342.

Bergua A, Skrandies W. An early antecedent to modern random dot stereograms-‘The Secret Stereoscopic Writing’ of Ramon y Cajal. *International Journal of Psychology* 2000; 36: 69-72.

Boutet I, Faubert J. Recognition of faces and complex objects in younger and older adults. *Memory & Cognition.* 2005 (Sous presse).

Brown B, Yap M, Fan W. Decrease in stereoacuity in the seventh decade of life. *Ophthalmic Physiol. Opt.* 1993; 13(2): 138-142.

Christophers RA, Rogers BJ, Bradshaw MF. Perceptual latencies, vergence eye-movements and random-dot stereograms. *Invest. Ophthalmol. and Vis. Sci.* 1993; 1438 (ARVO Abstracts)

Clarke WN, Noel LP. Stereoacuity testing in the monofixation syndrome. *J. Pediatr. Ophthalmol. Strabismus.* 1990; 27(3): 161-163.

Cooper J, Feldman J. Random-dot-stereogram performance by strabismic, amblyopic, and ocular-pathology patients in an operant-discrimination task. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.* 1978; 55(9): 599-609.

Cormack LK, Stevenson SB, Schor SM. Interocular correlation, luminance contrast and cyclopean processing. *Vision Res.* 1991; 31(12): 2195-2207.

Cormack LK, Riddle RB. Binocular correlation detection with oriented dynamic random-line stereograms. *Vision Res.* 1996; 36(15): 2303-2310.

Cormack LK, Landers DD, Ramakrishan S. Element density and the efficiency of binocular matching. *J Opt. Soc. Am A*. 1997; 14(4): 723-730.

Crone RA. The history of stereoscopy. *Documenta Ophthalmologica* 1992; 81(1): 1-16.

Cumming BG, Parker AJ. Responses of primary visual cortical neurons to binocular disparity without depth perception. *Nature*. 1997; 389(6688): 280-283.

Cumming BG, DeAngelis GC. The physiology of stereopsis. *Annu. Rev. Neurosci.* 2001; 24: 203-38.

Edwards M, Pope DR, Schor CM. First- and second-order processing in transient stereopsis. *Vision Res*. 2000; 40(19): 2645-51.

Erkelens CJ. Organisation of signals involved in binocular perception and vergence control. *Vision Res*. 2001; 41(25-26): 3497-3503.

Eskridge JB, Amos JF, Bartlett JD.(1991) *Clinical Procedures in Optometry*. J.B. Lippincott Company, Philadelphie.

Faubert J, Bellefeuille A. Effects of aging on intra- and inter-attribute spatial frequency information for luminance, color, and working memory. *Vision Res*. 2002; 42(3): 369-378.

Faubert J. Visual perception and aging. *Can. J. Exp. Psychol*. 2002; 56(3): 164-176.

Gheorghiu E, Erkelens CJ. Spatial-scale interaction in human stereoscopic vision in response to sustained and transient stimuli. *Vision Res*. 2004; 44(6): 563-575.

Greene HA, Madden DJ. Adult age differences in visual acuity, stereopsis, and contrast sensitivity. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.* 1987; 64: 749-753.

Habak C, Faubert J. Larger effect of aging on the perception of higher-order stimuli. *Vision Res.* 2000; 40(8); 943-950

Haegerstrom-Portnoy G, Schneck ME, Brabyn JA. Seeing into old age: Vision function beyond acuity. *Optom. and Vis. Sci.* 1999; 76(3): 141-158.

Harris JM, Parker AJ. Efficiency of stereopsis in random dot stereograms. *J. of the Opt. Soc. of Am. A.* 1992; 1: 14-24.

Harris JM, Parker AJ. Constraints on human stereo dot matching. *Vision Res.* 1994; 34(20): 2761-2772.

Harwerth RS, Fredenburg PM. Binocular vision with Primary Microstrabismus. *Invest. Ophthalmol. and Vis. Sci.* 2003; 44(10): 4293-4306.

Herbert AM, Overbury O, Singh J, Faubert J. Aging and bilateral symmetry detection. *Journal of Gerontology B: Psychological Sciences.* 2002; 57: 241-245.

Hess RF, Wilcox LM. Linear and non-linear filtering in stereopsis. *Vision Res.* 1994; 34(18): 2431-2438.

Houston CA, Cleary M, Dutton GN, McFadzean RM. Clinical characteristics of microtropia-is microtropia a fixed phenomenon? *Br. J. Ophthalmol.* 1998; 82(3): 219-224.

Julesz B. Binocular depth perception of computer-generated patterns. *Bell Syst. Tech. J.* 1960; 39: 1125-1162.

Julesz B. (1971) *Foundations of Cyclopean Perception*. The University of Chicago Press, Chicago.

Julesz B, Kropfl W, Petrig B. Large evoked potentials to dynamic random-dot correlograms and stereograms permit quick determination of stereopsis. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1980; 77(4): 2348-2351.

Julesz B. (1995) *Dialogues on Perception*. MIT Press, Cambridge, London.

Kaye M. Stereopsis without binocular correlation. *Vision Res*. 1978; 18(8): 1013-1022.

Kemp M. Julesz's joyfulness. *Nature* 1998; 396(6710): 419.

Kovacs I, Fehér A. Non-Fourier information in Bandpass noise Patterns. *Vision Res*. 1997; 37(9): 1167-1175.

Lang J. Anomalous retinal correspondence update. *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol*. 1988; 226(2): 137-140.

Livingstone MS. Differences between stereopsisn interocular correlation and binocularity. *Vision Res*. 1996; 36(8): 1127-1140.

Lovasik JV, Szymkiw M. Effects of aniseikonia, anisometropia, accommodation, retinal illuminance, and pupil size on stereopsis. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci*. 1985; 26(5): 741-50.

Mallot HA, Roll A, Arndt PA. Disparity-evoked vergence is driven by interocular correlation. *Vision Res*. 1996; 36(18): 2925-2937.

Mansouri B, Allen HA, Hess RF. Detection, discrimination and integration of second-order orientation information in strabismic and anisometropic amblyopia. *Vision Res*. 2005; 45(18): 2449-2460.

Masson GS, Busetini C, Miles FA. Vergence eye movement in response to binocular disparity without depth perception. *Nature*. 1997; 389(6688): 283-286.

McColl SL, Ziegler L, Hess RF. Stereodeficient subjects demonstrate non-linear stereopsis. *Vision Res*. 2000; 40(9): 1167-1177.

Menz MD, Freeman RD. Stereoscopic depth processing in the visual cortex : a coarse to fine mechanism. *Nature Neuroscience*. 2003; 6(1): 59-65.

Mitchell DE, O'Hagan S. Accuracy of stereoscopic localization of small line segments that differ in size or orientation for the two eyes. *Vision Res*. 1972; 12(3): 437-454.

Moseley M, Fielder A, et al. (2002) *Amblyopia a Multidisciplinary Approach*. Butterworth Heinemann, Oxford.

Muller C, Lankheet MJM., van de Grind WA. Binocular correlation does not improve coherence detection for fronto-parallel motion. *Vision Res*. 2004; 44(16): 1961-1969.

Neri P, Parker AJ, Blakemore C. Probing the human stereoscopic system with reverse correlation. *Nature*. 1999; 401(6754): 695-698.

Nieder A. Stereoscopic vision: solving the correspondence problem. *Current Biology*. 2003; 13(10): 394-396.

Norman JF, Dawson TE, Butler AK. The effects of age upon the perception of depth and 3-D shape from differential motion and binocular disparity. *Perception*. 2000; 29(11): 1335-1359.

Ohlsson J, Villarreal G, Abrahamsson M, et al. Screening merits of the Lang II, Frisby, Randot, Titmus, and TNO stereo tests. *J. of Am. Ass. for Ped. Ophthalmol. and Strab*. 2001; 5(5):316-22.

Palmer SE. (1999) *Vision Science, Photons to Phenomenology*. MIT Press, Cambridge, London.

Palmisano S, Allison RS, Howard IP. Effect of decorrelation on 3-D grating detection with static and dynamic random-dot stereograms. *Vision Res.* 2005; article sous presse disponible sur le site web.

Prince SJ, Eagle RA. Stereo correspondence in one-dimensional Gabor stimuli. *Vision Res.* 2000; 40: 913-924.

Rose D, Price E. Functional separation of global and local stereopsis investigated by cross-adaptation. *Neuropsychologia.* 1995; 33(3): 269-274.

Rutstein RP, Corliss DA. BVAT Distance vs. Near Stereopsis Screening of Strabismus, Strabismic Amblyopia and Refractive Amblyopia; A Prospective Study of 68 Patients. *Binocular Vision & Strabismus Quarterly.* 2000; 15(3): 229-236.

Saladin JJ, Carr LW. Fusion lock diameter and the forced vergence fixation disparity curve. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.* 1983; 60(12): 933-43.

Saladin J. Stereopsis from a performance perspective. *Optom. Vis. Sci.* 2005; 82(3): 186-205.

Schmidt PP. Sensitivity of random dot stereoacuity and Snellen acuity to optical blur. *Optom. Vis. Sci.* 1994; 71(7): 466-471.

Schneck ME, Haegerstrom-Portnoy G, Lott LA, Brabyn JA. Ocular contribution to age-related loss in coarse stereopsis. *Optom. and Vis. Sci.* 2000; 77(10): 531-536.

Schor C, Heckmann T, Tyler CW. Binocular fusion limits are independent of contrast, luminance gradient and component phases. *Vision Res.* 1989; 29(7): 821-835.

Sekuler R, Blake R. (2002) *Perception, fourth edition*. McGraw-Hill, Boston, Montreal, Toronto.

Simons K, Avery KE, Novak A. Small-target random dot stereogram and binocular suppression testing for preschool vision screening. *J. Pediatr. Ophthalmol. Strabismus*. 1996; 33(2): 104-113.

Smith AT, Greenlee MW, Singh KD, Kraemer FM, Henning J. The processing of first- and second-order motion in human visual cortex assessed by functional magnetic resonance imaging (fMRI). *Journal of Neuroscience* 1998; 18(10): 3816-3830.

Spear PD. Neural bases of visual deficits during aging. *Vision Res*. 1993; 33(18): 2589-2609.

Stevenson SB, Cormack LK, Schor CM. Depth attraction and repulsion in random dot stereograms. *Vision Res*. 1991; 31(5): 805-813.

Tyler W, Julesz B. Binocular cross-correlation in time and space. *Vision Res*. 1978; 18(1): 101-105.

Von Noorden GK. (1996) *Binocular Vision and Ocular Motility, Theory and Management of Strabismus, fifth edition*. Mosby, St. Louis.

Wilcox LM, Hess RF. Scale selection for second-order (non-linear) stereopsis. *Vision Res*. 1997; 37(21): 2981-2992.

Wilcox LM, Hess RF. When stereopsis does not improve with increasing contrast. *Vision Res*. 1998; 38(23): 3671-3679.

Wilcox LM. First and second-order contributions to surface interpolation. *Vision Res*. 1999; 39(14): 2335-2347.

Wong EH, Levi DM, McGraw PV. Is second-order loss in amblyopia explained by the loss of first-order spatial input? *Vision Res.* 2001; 41(23): 2951-2960.

Wong EH, Levi DM, McGraw PV. Spatial interactions reveal inhibitory cortical networks in human amblyopia. *Vision Res.* 2005; 45(21): 2810-2819.

Wright LA, Wormald RP. Stereopsis and aging. *Eye.* 1992; 6(pt 5): 473-476.

Yap M, Brown B, Clarke J. Reduction in stereoacuity with age and reduced retinal illuminance. *Ophthalmic and Physiological Optics.* 1994; 14(3): 298-301.

Zaroff CM, Knutelska M, Frumkes TE. Variation in stereoacuity: Normative description, fixation disparity and the roles of aging and gender. *Invest. Opth. and Vis. Sci.* 2003; 44(2): 891-900.

Ziegler LR, Hess RF, Kingdom FAA. Global factors that determine the maximum disparity for seeing cyclopean surface shape. *Vision Res.* 2000; 40(5): 493-502.

Ziegler LR, Hess RF. Stereoscopic depth but not shape perception from second-order stimuli. *Vision Res.* 1999; 39(8): 1491-507.

ORIGINAL ARTICLE

Effect of Aging on Stereoscopic Interocular Correlation

STÉPHANE LAFRAMBOISE, OD, DANIELLE DE GUISE, OD, MSc, and
JOCELYN FAUBERT, PhD, FAAO

Visual Psychophysics and Perception Laboratory, School of Optometry, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada

ABSTRACT

Purpose. This study was designed to evaluate the minimum interocular correlation (IOC) needed by the visual system to correctly perceive a static stereoscopic stimulus as a function of normal aging. It was also our goal to evaluate the feasibility of clinical charts testing this aspect of visual perception.

Methods. Stereoscopic IOC threshold was determined in 100 normal observers (average age \pm standard deviation, 45.7 \pm 20.4 years) drawn from a clinical population between the ages of 10 and 85. We used partially correlated red-green random dot stereograms (RDS) displaying flat, square surfaces at 360 arcsec of either crossed or uncrossed disparity.

Results. Older observers needed a higher binocular correlation to perceive the stereoscopic stimuli when compared with the younger groups. There is a slight increase in the threshold value of the individuals in the 45- to 64-year-old group and a further effect on the observers over 65 years of age. Data did not reveal any effects of gender, near point phoria, or fixation disparity on IOC thresholds.

Conclusions. Normal aging produces a statistically significant deficit in binocular correlation processing. This process is marginally correlated with stereo acuity measures even when stereoacuity floor effects are factored out. Although further experiments directly comparing stereoacuity and IOC are necessary and more refining is required to obtain optimum parameters, clinical stereoscopic IOC test charts appear feasible and may not assess the same processes as stereoacuity charts. (*Optom Vis Sci* 2006;83:589-593)

Key Words: stereoscopic vision, stereoscopic correlation, aging, binocular, stereoacuity

Stereoscopic perception occurs so effortlessly that it could seem to be a simple aspect of visual processing. In fact, it is apparent that simplicity hides a process far more complex than we could suspect. One of the most intriguing parts of this process is how image points are matched between the two eyes before disparity processing is performed. This step is often called the binocular correspondence problem and is a necessary part of stereoscopic perception.¹⁻³

It was thought for a long time that a great deal of monocular processing and shape recognition was a prerequisite for the binocular matching process to occur. However, as demonstrated by Julesz' computer-generated random dot stereograms,⁴ this assumption was overturned by the fact that stereopsis can emerge from the presentation of stereograms in which monocular shape recognition is very unlikely. To study the correspondence problem and the correlation threshold, the use of random dot stereograms (RDS) is of primary importance because they are the only type of stimulus that does not contain monocular clues for depth and shape.⁴

In dense (50% density) stereograms, perception of depth is possible only if the interocular correlation (IOC) is above a certain threshold. Therefore, detection of IOC is an important step in stereopsis.⁵

In general, IOC can be described as the degree to which images perceived from both eyes match one another. Interocular correlation in a RDS is the proportion of dots identically positioned at disparity "d" while the remainder is randomly positioned.^{6,7} Thus, an IOC of 100% would be fully correlated, whereas a value of 0% is a purely random stereogram.

The salience of a flat plane at disparity "d" decreases as we decrease the IOC.^{1,3,5,6} Most of the studies involved used computer-generated dynamic stimuli and their tasks required some training to be accurately performed. Because motion and training are now known to greatly facilitate binocular correlation detection,^{1,8} their results cannot be extrapolated to a clinical evaluation using static stimuli. Thus, it is still not well established how many points need to be correctly matched to form a robust depth perception from a RDS.²

Some abilities decline during normal aging even in the absence of any ocular pathologies, which could be indicative of neural changes in the elderly.⁹ Among these abilities, stereopsis is probably the most indicative of neural changes that can be easily tested by clinicians in office settings. Many authors have concluded that stereoacuity effectively decreases with increasing age, even in coarse stereopsis tasks.^{8,10–12} They also supposed that this loss in stereopsis can be mostly accounted for by neural changes of the visual pathway, but it is still unclear which factors explain the apparent loss. However, the study performed by Haegerstrom-Portnoy and colleagues on 900 individuals concluded that most of the important decline in coarse stereopsis (performed with the Frisby test) is caused by alterations in early stages of vision processing (i.e., loss of transparency of the ocular media and retinal dysfunction).¹³

Other studies have reported the significant effect of aging on the processing of second-order stimuli. These stimuli are defined by motion, texture, or depth (including RDS) and are more complex to process than first-order stimuli, which are defined by luminance or color.¹⁴ Studies demonstrated, some with the help of functional magnetic resonance imaging, that second-order properties involve additional brain areas and require more extensive processing for the brain to perceive the image.¹⁵ Thus, the larger neural network required for this processing presents additional opportunities to detect the effect of aging on neural function.¹⁶

The present study evaluates what baseline IOC is needed by the visual system to still be able to perceive a static flat plane at a given disparity. We also investigated if aging can influence the response of normal observers on such a task. The relationship among gender, Randot stereoacuity, near point phoria, and fixation disparity with IOC has also been examined in our study.

MATERIALS AND METHODS

Subjects

A total of 100 subjects (mean age \pm standard deviation [SD], 45.7 ± 20.4 years) was randomly chosen in an optometric clinical population. We tried to evenly distribute the observers among four age groups. Those age groups were respectively 10 to 25 ($n = 21$; mean age \pm SD, 16.9 ± 3.9 years), 26 to 45 ($n = 26$; 36.5 ± 5.9 years), 46 to 65 ($n = 31$; 52.8 ± 4.2 years), and 66 to 85 ($n = 22$; 73.9 ± 6.1 years) years old.

Testing sessions were conducted immediately after a complete eye examination of the subject performed by one of the authors (SL). Informed consent was obtained from each observer after the individual or his or her parent reviewed a letter of information. Every subject had to be at least 10 years old. Visual acuity was restricted to 20/20 (6/6) or better in each eye as measured with the Snellen chart at 20 feet. Observers with any amount of refractive error were included as long as their refraction showed no more than 1.50 D of anisometropia. The required stereoacuity was 50 arcsec or better as measured with the Randot Stereogram test. Ocular motility, distance phoria, near point phoria, and fixation disparity were also carefully tested, but were not restrictive. Subjects had to be exempt of any manifest ocular or neural disease. Special care was taken with regard to the presence of media opacities and the integrity of the macula; subjects with any obvious abnormality were rejected.

Stimuli

The test was presented as a 50% density random dot stereogram generated by the Matlab PC program and printed on white sheets using a Hewlett-Packard 1500L Laserjet color printer (Hewlett-Packard Company, Montreal, Quebec, Canada). The stereogram was composed of red, green, and black dots on a yellow background. Every dot of the stereogram was 0.355 mm wide and subtended approximately 180 arcsec at the 40-cm viewing distance.

The visual stimuli formed by the stereograms were square-shaped flat planes consisting of 40×40 red, green, or black dots subtending four square degrees. To perceive the stimuli, the observers needed red–green glasses as a means of separating the eyes' points of view. Outside the stereoscopic squares, the stereogram was made of randomly distributed black dots on the yellow background and was thus fully correlated (100%) at zero disparity. The disparity of each square stimulus was randomly made either crossed (in front of the chart plane) or uncrossed (behind the chart plane) and always had an absolute value of 360 arcsec (i.e., two dots of disparity).

The stereogram charts contained six rows of five stereoscopic square stimuli. A total of six charts were made: three “easy” and three “difficult.” Each row of stimuli was attributed a constant correlation value. The three easy charts contained, from top row to bottom row, the correlation values of 100%, 90%, 80%, 70%, 60%, and 50%. The difficult charts presented correlation values of 60%, 40%, 30%, 25%, 20%, and 15%.

Experimental Procedures

The testing session occurred in the room where the eye examination took place. Observers were tested in accordance with the Declaration of Helsinki for research involving human subjects. The illumination in the room was normal light condition. The subject wore his or her best correction for reading distance (40 cm) as determined by the visual examination. He or she was then asked to put the red–green filters over the prescription eyeglasses.

When ready, the observer was presented with a randomly selected easy chart at 40 cm. The subject was then asked to indicate if he or she could see the squares on the first row (100% correlation). Some observers needed a few seconds to adapt to the test, but all were able to perceive the stereoscopic squares on the first row. The subject had to mention for each square if it was perceived as being in front or behind the plane of the chart. The subject gave his or her answer verbally and did not get any feedback as to whether his or her answer was correct. To proceed to the next row, the subject had to correctly identify four out of the five stimuli. No time limit was set to perform the test and subjects were asked to take the time needed to be sure of their answers before they responded. Threshold was set as the last correlation value at which the observer could correctly perceive a minimum of four stimuli in a row of five. If the entire easy chart was correctly identified, the subject was then presented with the difficult chart and answered in the same fashion. The whole procedure was performed a second time and the average of both results was used for statistics (Fig. 1).

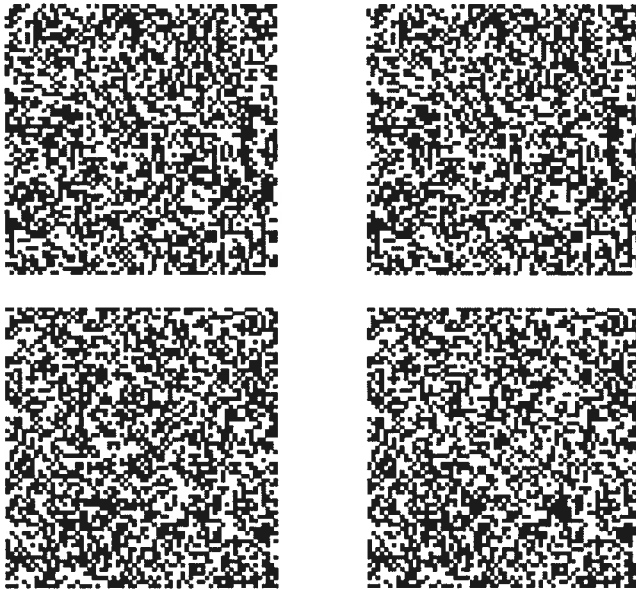


FIGURE 1.

Examples of stimuli used. Top images represent an interocular correlation (IOC) of 100% crossed disparity square. Bottom elements represent a 50% IOC uncrossed square (uncrossed fusers). The real charts used red–green filters to separate the input for each eye.

RESULTS

The distribution of the binocular correlation threshold of the observers plotted as a function of age can be viewed in Figure 2. The average performance threshold in our sample is 31.72% with a standard deviation of 8.48%. We fitted our sample's data with a linear regression function and we obtained a significant positive slope ($n = 100$; percent/year \pm standard error [SE], 0.14 ± 0.04 ; $t_{98} = 3.5$; $p < 0.001$). The correlation between age and stereoscopic IOC is low but significant ($r = 0.33$; $t_{98} = 3.27$; $p < 0.01$) and yields a determination factor of 11%.

When grouped into age categories, the analysis of variance (ANOVA) reveals a significant difference between groups ($F_{[3,96]} = 3.81$; $p < 0.05$). As can be seen in Table 1, individuals in the older age groups have higher thresholds than the observers in the younger age groups. Post hoc t tests with inference correction (Bonferroni) showed a significant difference between the 66- and 85-year-old groups and all the other observers ($t_{98} = 2.46$; $p <$

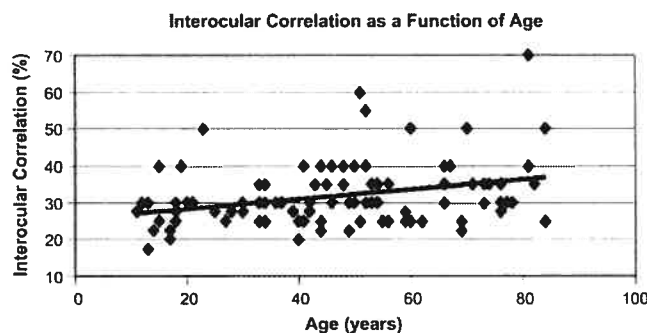


FIGURE 2.

The interocular correlation for the 100 subjects plotted against their age. The line represents the linear trend.

TABLE 1.

Interocular correlation data for the 100 subjects divided into age groups

Age group (years)	n	Correlation (%)	Standard deviation (%)	Standard error (%)
10–25	21	28.81	7.32	1.60
26–45	26	29.04	5.05	0.99
46–65	31	33.23	8.83	1.59
66–85	22	35.55	10.49	2.24
Total	100	31.72	8.48	0.85

0.01). We also found a significant decrease in the performance of the 46- to 65-year-old group when compared with the younger groups ($t_{76} = 2.54$; $p < 0.01$).

When females ($n = 64$; IOC \pm SD, 30.89 ± 6.75) and males ($n = 36$; 33.19 ± 10.85) are grouped separately, the t test shows no significant difference between groups. Also, we found no correlation between near point phorias ($r = 0.07$) or fixation disparity ($r = 0.14$) with IOC. These factors seem to have little link with the stereoscopic IOC threshold in the perception of a static stereoscopic shape for our population.

Further analysis revealed that baseline Randot stereoacuity has a low, but significant, correlation with stereoscopic IOC ($r = 0.44$; $t_{98} = 4.87$; $p < 0.001$). Thus, stereoacuity would account for 19% of the variation of stereoscopic IOC thresholds according to our data. However, our stereoacuity data are restricted by our selection criterion (50 arcsec) and the Randot's finest disparity (20 arcsec). To circumvent this problem, we have recalculated the correlation between stereoacuities and IOC thresholds on a subset of individuals. We eliminated all the subjects who reached 20 arcsec as to avoid a floor effect, leaving us with 44 subjects who never reached the limits of the Randot Stereoagram test. The new correlation results are almost identical to the ones obtained when all subjects were analyzed ($r = 0.43$, $t_{42} = 3.12$; $p < 0.01$). The new calculation reveals that stereoacuity would account for 19% of the variation of stereoscopic IOC thresholds, exactly like the previously calculated value.

We plotted stereoacuity against stereoscopic IOC (Fig. 3) to illustrate the relationship between both variables. The trend of the relation between variables is represented by the line on the graph ($n = 100$; arcsec/percent \pm SE, 0.46 ± 0.09 ; $t_{98} = 4.90$; $p < 0.001$).

Furthermore, the ANOVA showed that age (Fig. 4) affects fine stereoacuity ($F_{[3,96]} = 6.24$; $p < 0.01$) as measured with the Randot test. Figure 4 shows the distribution of the observers' fine stereoacuity as a function of their age. We fitted the distribution with a linear regression (solid line), and we obtained a significant positive slope similar to the one obtained with stereoscopic IOC as a function of age ($n = 100$; arcsec/year \pm SE, 0.17 ± 0.04 ; $t_{98} = 4.25$; $p < 0.001$).

The weak but significant correlation between stereoscopic IOC and stereoacuity performances could be the result of aging on both processes independently. To further establish whether there were similar properties between these two variables, we elected to isolate observers that performed poorly on both tasks. The proportion of individuals in our sample with a fine stereoacuity deficit ($p < 0.05$ when compared with their age group) is approximately 26% ($n =$

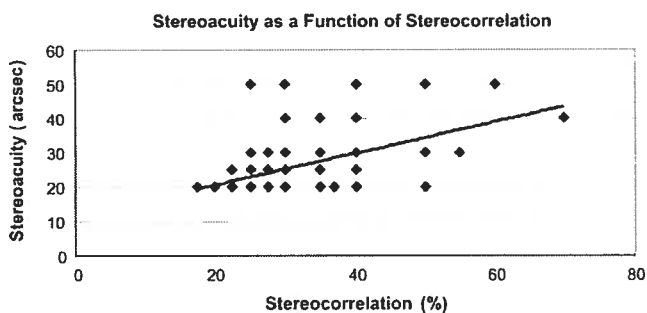


FIGURE 3.

The Randot stereoaucuity for the 100 subjects plotted against their stereoscopic interocular correlation. The line represents the linear trend.

100; 95% $IC_{11} = [0.17, 0.35]$). This proportion rises to 56% ($n = 23$; 95% $IC_{11} = [0.35, 0.77]$) when we consider only the subjects with a stereoscopic IOC deficit ($p < 0.05$ when compared with their age group).

So it can be hypothesized that aging affects both stereoaucuity and IOC processing without the two necessarily involving the same neural operation, although there must be an overlap between mechanisms.

DISCUSSION

Our findings indicate that there is a significant effect of aging on binocular correspondence processing. Older subjects required a higher level of IOC to correctly perceive a stereoscopic stimulus. Our results also indicate a small but significant correlation between fine stereoaucuity performance and results to our stereoscopic IOC task. Obviously, there must be an overlap between both processes, but we cannot conclude from the present results whether the same underlying mechanisms are involved in the small age-related loss on both functions given the different scales used. However, a confidence interval subanalysis on our data hints at the notion that they should only partially overlap.

One of the studies that more closely resembles ours suggests that there would be no effect of aging on low IOC stereopsis performance. In a stereoscopic shape recognition task, Norman and colleagues found that the decline in performance was remarkably the same for both younger and older groups when they reduced the binocular correlation of their stimuli.¹⁷ However, they used more prominent shapes for the older observers than for the younger observers. Also, their apparatus and methodology were significantly different from ours and they did not use correlation values inferior to 40%. These differences between both studies can explain the divergence between their conclusion and our results.

The true "normal population" aging effect could even be more important than shown here when we consider that our study is probably biased by our very strict selection of candidates (20/20 or 6/6). People who present with ocular problems associated with aging may also have more marked perception processing changes without the two being causally related. It could indicate a faster aging process of all aspects of the visual pathway and of the individual at a larger scale.¹³ Therefore, our inclusion criterion should bias older individuals whose binocular processing is less affected by aging.

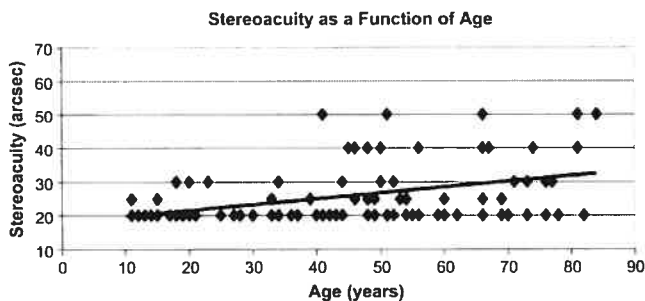


FIGURE 4.

The Randot stereoaucuity for the 100 subjects plotted against their age. The solid line represents the linear trend.

One of the factors that would be more likely to modify results to our test is the density of the elements in the stereograms we used. At least one study indicates that efficiency of binocular combination decreases as the density of elements increases in RDS. Thus, 50% RDS would be less than optimal for correlation tasks.¹⁸ The authors of that study suggest that a density of 20% would be more favorable to the performance of the observers, at least for the detection of correlation in a dynamic stimulus. Once again, it would be interesting to observe the effect of this factor in our test apparatus and, furthermore, its effect on aged observers.

With the results of our study, we have more evidence of second-order processing age-related loss. Such results have already been found in previous work.¹⁶ For instance, age-related effects have been found for processing symmetry,¹⁹ second-order orientation and motion perception,¹⁴ interattribute spatial processing,²⁰ and decreased capacity for processing human faces in the elderly.²¹ Faubert¹⁶ concluded that perceptual processes that solicit larger neural networks are more affected by aging because of the saturation of alternative routes required in the aging brain to process perceptual input.

The clinical use of an IOC stereopsis test chart is still unresolved but appears feasible with further optimization of the chart. Further investigation needs to be conducted to isolate abnormal conditions of the visual pathway that could induce a marked reduction of performance to our test. These conditions could include amblyopia, anisometropia, strabismus or neural diseases like Alzheimer or Parkinson disease.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by Canadian Institutes of Health Research Grant to JF.

Received August 28, 2005; accepted April 26, 2006.

REFERENCES

1. Muller C, Lankheet MJ, Van De Grind WA. Binocular correlation does not improve coherence detection for fronto-parallel motion. *Vision Res* 2004;44:1961–9.
2. Harris JM, Parker AJ. Constraints on human stereo dot matching. *Vision Res* 1994;34:2761–72.
3. Cormack LK, Riddle RB. Binocular correlation detection with oriented dynamic random-line stereograms. *Vision Res* 1996;36:2303–10.

4. Julesz B. *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago: University of Chicago Press; 1971.
5. Gheorghiu E, Erkelens CJ. Spatial-scale interaction in human stereoscopic vision in response to sustained and transient stimuli. *Vision Res* 2004; 44:563–75.
6. Cormack LK, Stevenson SB, Schor CM. Interocular correlation, luminance contrast and cyclopean processing. *Vision Res* 1991;31: 2195–207.
7. Tyler CW. Binocular cross-correlation in time and space. *Vision Res* 1978;18:101–5.
8. Zaroff CM, Knutelska M, Frumkes TE. Variation in stereoacuity: normative description, fixation disparity, and the roles of aging and gender. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2003;44:891–900.
9. Spear PD. Neural bases of visual deficits during aging. *Vision Res* 1993;33:2589–609.
10. Wright LA, Wormald RP. Stereopsis and ageing. *Eye* 1992;6:473–6.
11. Brown B, Yap MK, Fan WC. Decrease in stereoacuity in the seventh decade of life. *Ophthalm Physiol Opt* 1993;13:138–42.
12. Haegerstrom-Portnoy G, Schneck ME, Brabyn JA. Seeing into old age: vision function beyond acuity. *Optom Vis Sci* 1999;76:141–58.
13. Schneck ME, Haegerstrom-Portnoy G, Lott LA, Brabyn JA. Ocular contributions to age-related loss in coarse stereopsis. *Optom Vis Sci* 2000;77:531–6.
14. Habak C, Faubert J. Larger effect of aging on the perception of higher-order stimuli. *Vision Res* 2000; 40:943–50.
15. Smith AT, Greenlee MW, Singh KD, Kraemer FM, Hennig J. The processing of first- and second-order motion in human visual cortex assessed by functional magnetic resonance imaging (fMRI). *J Neurosci* 1998; 18:3816–30.
16. Faubert J. Visual perception and aging. *Can J Exp Psychol* 2002; 56:164–76.
17. Norman JF, Dawson TE, Butler AK. The effects of age upon the perception of depth and 3-D shape from differential motion and binocular disparity. *Perception* 2000; 29:1335–59.
18. Cormack LK, Landers DD, Ramakrishnan S. Element density and the efficiency of binocular matching. *J Opt Soc Am (A)* 1997;14: 723–30.
19. Herbert AM, Overbury O, Singh J, Faubert J. Aging and bilateral symmetry detection. *J Gerontol (B)* 2002;57:P241–5.
20. Faubert J, Bellefeuille A. Aging effects on intra- and inter-attribute spatial frequency information for luminance, color, and working memory. *Vision Res* 2002;42:369–78.
21. Boutet I, Faubert J. Recognition of faces and complex objects in younger and older adults. *Memory Cogn* 2006; 34:in press.

Jocelyn Faubert

*Visual Psychophysics and Perception Laboratory
School of Optometry
Université de Montréal
C.P. 6128, succursale Centre-Ville
Montreal, Quebec, H3C 3J7, Canada
e-mail: [REDACTED]*