

Université de Montréal

**Impact de l'âge et de l'effet stéréoscopique  
sur une tâche de poursuite d'objets multiples**

par  
Marjolaine Plourde

École d'optométrie

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de maîtrise en sciences de la vision  
option sciences fondamentales

Septembre 2017

© Marjolaine Plourde, 2017

## Résumé

La vision 3D se développe durant l'enfance et tend à se dégrader après 65 ans. La façon dont cette stéréoscopie peut être utilisée dans un environnement plus complexe, par exemple lors d'un déplacement dans une foule où des objets en mouvement peuvent s'occlure, reste incertaine. Une tâche reflétant cet environnement dynamique est la poursuite d'objets multiples (*Multiple Object Tracking* ou MOT). Pour cette étude, le NeuroTracker™ sur tablette présentant une tâche de MOT a été utilisée en format 2D et 3D, dans le but d'évaluer l'impact de l'effet stéréoscopique sur les performances en fonction de l'âge. Trois groupes de 20 sujets (7-12 ans, 18-40 ans et 65 ans et plus) ont exécuté la tâche au MOT dans les deux conditions. Les adultes ont obtenu les scores moyens les plus élevés, suivis des enfants puis des aînés. Également, la différence entre les scores avec et sans effet stéréoscopique était similaire pour les enfants et les adultes, alors qu'elle était négligeable pour les adultes âgés. Ainsi, la stéréoscopie faciliterait l'exécution de cette tâche complexe pour les adultes et les enfants dès 7-12 ans. Le NeuroTracker™, en permettant une évaluation de l'utilisation de la stéréoscopie dans une scène complexe, pourrait devenir un outil intéressant dans différents domaines. La portabilité de la version sur tablette faciliterait l'utilisation clinique avec des populations variées.

**Mots-clés :** sciences de la vision, vision stéréoscopique, vieillissement, enfant, MOT

## **Abstract**

3D vision develops during childhood and tends to diminish after 65 years old. It is relatively unknown how stereopsis helps in a more complex environment, such as walking in a crowd where objects in movement can occlude each other. One task that reflects this dynamic environment is a multiple object tracking task (MOT). For this research, the portable version of NeuroTracker™ showing a MOT task with and without stereoscopic effect has been used, to evaluate the impact of stereopsis on performances depending on the age. Three groups of 20 subjects (7-12 years old, 18-40 years old and 65 years and older) completed the task in both conditions. The adult group obtained the higher scores (mean of both conditions), followed by the children and the older adult group. Also, the score difference between both conditions was similar for the adults and the children, and was non significant for the elderlies. It demonstrates that stereopsis helps adults and children 7-12 years old to accomplish this kind of task. The NeuroTracker™, by evaluating how stereopsis is used in a complex scene, could be useful in various domains. The portability of the NeuroTracker™ could also facilitate its clinical application with different populations.

**Keywords:** vision sciences, stereoscopic vision, aging, children, MOT

# Table des matières

|   |            |
|---|------------|
| <b>Résumé</b> .....                               | <b>i</b>   |
| <b>Abstract</b> .....                             | <b>ii</b>  |
| <b>Table des matières</b> .....                   | <b>iii</b> |
| <b>Liste des figures</b> .....                    | <b>v</b>   |
| <b>Liste des sigles et abréviations</b> .....     | <b>vi</b>  |
| <b>Lexique</b> .....                              | <b>vi</b>  |
| <b>Remerciements</b> .....                        | <b>vii</b> |
| <b>Chapitre 1 : Introduction</b> .....            | <b>1</b>   |
| <b>1 La stéréoscopie</b> .....                    | <b>2</b>   |
| 1.1 Définition .....                              | 2          |
| 1.2 Types de stéréogramme .....                   | 3          |
| 1.3 Évaluation clinique .....                     | 3          |
| 1.4 Stéréoscopie dynamique .....                  | 5          |
| 1.5 Analyse cérébrale de la stéréoscopie .....    | 6          |
| 1.6 Utilité de l'effet stéréoscopique .....       | 7          |
| <b>2 Le système visuel de l'enfant</b> .....      | <b>7</b>   |
| 2.1 Le développement des fonctions visuelles..... | 7          |
| 2.2 La stéréoscopie chez l'enfant.....            | 9          |
| <b>3 Le système visuel de l'âge</b> .....         | <b>11</b>  |
| 3.1 Vieillessement du système visuel.....         | 11         |
| 3.2 La stéréoscopie chez l'âge .....              | 12         |
| <b>4 3D-MOT</b> .....                             | <b>13</b>  |
| 4.1 Présentation.....                             | 13         |
| 4.2 Le MOT chez l'âge .....                       | 15         |
| 4.3 Le MOT chez l'enfant.....                     | 16         |
| <b>5 Objectifs et hypothèses</b> .....            | <b>17</b>  |

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>6 Méthodologie .....</b>         | <b>18</b> |
| <b>Chapitre 2 : Article .....</b>   | <b>20</b> |
| <b>Chapitre 3 : Discussion.....</b> | <b>35</b> |
| <b>Chapitre 4 : Conclusion.....</b> | <b>39</b> |
| <b>Bibliographie .....</b>          | <b>40</b> |

# Liste des figures

## Chapitre 1

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : L'horoptère et l'aire de Panum .....        | 2  |
| Figure 2 : Test de Titmus .....                        | 4  |
| Figure 3 : <i>Randot Stereotest</i> <sup>®</sup> ..... | 4  |
| Figure 4 : les étapes de la tâche au MOT .....         | 19 |

## Chapitre 2

|   |    |
|---|----|
| Fig 1 : Steps of the 3D-MOT task .....  | 26 |
| Fig 2 : Scores for each condition and group .....   | 28 |
| Fig 3 : Score differences between both conditions (stereopsis advantage) for each group ..... | 29 |

## Liste des sigles et abréviations

|        |  |
|--------|--|
| 3D     | Trois dimensions                           |
| 3D-MOT | Three-Dimensional Multiple Object Tracking |
| mm     | millimètre                                 |
| MOT    | Multiple Object Tracking                   |

## Lexique

Enfant : 0 à moins de 18 ans

Adulte : 18 à moins de 65 ans

Adulte âgé : 65 ans et plus

# Remerciements

Je tiens à remercier du fond du cœur ma directrice de maîtrise, Marie-Ève Corbeil, pour son énergie, son support et sa présence tout au long du processus.

Merci à mon co-directeur de maîtrise, Jocelyn Faubert, pour sa passion contagieuse de la recherche en sciences de la vision.

Merci aux optométristes qui m'entourent et m'inspirent à faire avancer la recherche pour notre belle profession.

Un merci spécial à l'école du Bois-Joli et sa directrice.

Finalement, merci à ma famille, mes amis et plus particulièrement Étienne pour les encouragements continus depuis le début de mon parcours universitaire.



# **Chapitre 1 : Introduction**

# 1 La stéréoscopie

## 1.1 Définition

La vision stéréoscopique correspond à la perception de profondeur obtenue lorsque les deux yeux perçoivent simultanément une image semblable. L'objet regardé est alors perçu simple, et en trois dimensions. La vision simple est possible lorsque des points rétinien correspondants sont stimulés : le système visuel analyse les images provenant de ces points correspondants comme provenant d'un seul et même point dans l'espace. Cette correspondance de points rétinien est possible tout le long de l'horoptère, qui se définit comme un plan circulaire passant par le point de fixation (1-3). Tous les points situés sur ce plan seront perçus simples (car stimulant des points rétinien correspondants), alors que les points à l'extérieur seront vus doubles (car stimulant des points rétinien non correspondants). Une exception existe à cette règle, puisqu'une zone légèrement plus grande que l'horoptère produira également une vision simple, mais sans stimuler des points rétinien correspondants. Cette zone est l'espace de Panum (1, 2) (figure 1). Une image située à l'intérieur de l'espace de Panum sera vue avec un angle légèrement différent pour chaque œil. Cette disparité entre l'image provenant des deux yeux sera analysée par le système visuel comme une impression de profondeur, ou effet stéréoscopique. Plus la disparité entre les deux images est élevée, plus l'impression de profondeur sera prononcée.

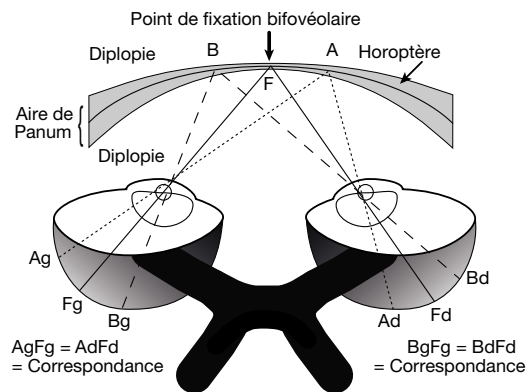


Figure 1 : L'horoptère et l'aire de Panum (4)

## 1.2 Types de stéréogramme

La mesure de l'acuité stéréoscopique fait partie de tout examen oculo-visuel complet, et peut être obtenue à l'aide de stéréogrammes à contours définis ou à points aléatoires. Les stéréogrammes à contours définis présentent des formes reconnaissables monoculairement, et une disparité est intégrée entre l'image présentée à chaque œil pour créer un effet de profondeur. La stéréoscopie évaluée avec de tels stéréogrammes est appelée stéréoscopie locale (1, 5, 6). Les stéréogrammes à point aléatoires, introduits en 1960 par Julesz, présentent un nuage de points aléatoires où aucune forme n'est visible monoculairement (7). Une portion de ces points aléatoires présente une disparité entre l'image présentée à l'œil droit et à l'œil gauche, créant une forme ayant un effet stéréoscopique. La stéréoscopie globale est ainsi mesurée (1, 5-7). La présence d'indices monoculaires dans les stéréogrammes à contours définis facilite la perception de profondeur et peut mener à des acuités stéréoscopiques supérieures à celles mesurées grâce aux stéréogrammes à points aléatoires (8-10).

## 1.3 Évaluation clinique

Différents tests sont disponibles pour mesurer l'acuité stéréoscopique locale et globale. L'effet stéréoscopique peut être créé par polarisation (le *Randot Stereotest*<sup>®</sup>, le test de *Titmus*, le *Random dot E*<sup>®</sup>, *Randot Preschool Stereoacuity test*<sup>®</sup>), par anaglyphes (*TNO*) ou simplement par profondeur réelle (le test de *Frisby*). Le test de *Titmus*, largement utilisé par les optométristes, présente des formes à contours définis, soit une mouche, une série d'animaux et une série de neuf carrés contenant chacun quatre cercles (1000 secondes d'arc pour la mouche, 400 à 100 secondes d'arc pour les animaux, 800 à 40 secondes d'arc pour les cercles) (figure 2). Un autre test également très répandu, le *Randot Stereotest*<sup>®</sup>, comprend une série de cercles et d'animaux à contours définis placés sur fond à points aléatoires (400 à 100 secondes d'arc pour les animaux, 400 à 20 secondes d'arc pour les cercles) et huit formes créées par points aléatoires (500 et 250 secondes d'arc) (figure 3).



Figure 2 : Test de Titmus



Figure 3 : *Randot Stereotest*®

Le *TNO*, quant à lui, utilise l'anaglyphe rouge-vert pour créer l'effet stéréoscopique. Des nappes de points aléatoires sont utilisées pour créer des formes non visibles en monoculaire, sur six planches différentes allant de 480 à 15 secondes d'arc. Bien qu'il soit l'un des seuls tests de stéréoscopie présentant des disparités fines à l'aide de points aléatoires, son utilisation est peu répandue en clinique. Finalement, un test beaucoup plus utilisé en recherche qu'en clinique, le test de *Frisby*, contient trois plaques transparentes d'épaisseurs différentes (6, 3 et 1,5 mm). Chaque plaque présente quatre carrés contenant des formes placées de façon aléatoire, et un seul de ces carrés contient un cercle imprimé sur l'autre face de la plaque. Le seuil d'acuité stéréoscopique mesuré grâce à ce test (600 à 15 secondes d'arc) dépend de la distance du test et de la plaque réussie par le sujet; plus la plaque réussie est mince et éloignée, plus la disparité mesurée est fine.

Ces différents tests ont souvent été comparés pour évaluer la relation entre chacun. Ainsi, le test de *Frisby*, les cercles du *Randot Stereotest*<sup>®</sup> et les cercles du test de *Titmus* ont une bonne répétabilité chez des sujets adultes ne présentant aucune anomalie de vision binoculaire. Le *TNO*, par contre, a une répétabilité inférieure et un faible niveau d'accord aux autres tests (9). La faiblesse du *TNO* réside également dans l'obtention d'acuités stéréoscopiques beaucoup plus faibles, en particulier chez les âgés (11). En comparant les acuités stéréoscopiques obtenues monoculairement et binoculairement à ces différents tests, l'influence des indices monoculaires peut être évaluée. Les indices monoculaires seraient ainsi présents jusqu'à 80 secondes d'arc pour les cercles du *Titmus* et jusqu'à 140 secondes d'arc pour les cercles du *Randot Stereotest*<sup>®</sup> (10). Il convient donc d'analyser avec précaution les acuités stéréoscopiques inférieures à ces seuils.

Le seuil normal d'acuité stéréoscopique dépend évidemment du test utilisé, et peut varier selon les conditions de tests. En laboratoire, des sujets entraînés à ces tests ont réussi à obtenir un seuil d'acuité stéréoscopique jusqu'à 2 secondes d'arc (1). Avec les tests cliniques couramment utilisés, une acuité stéréoscopique est généralement considérée normale à partir de 40 secondes d'arc. (1, 4, 12-14). Ces acuités stéréoscopiques, bien qu'elles varient selon l'âge, ne sont pas influencé par le sexe (15).

#### **1.4 Stéréoscopie dynamique**

Les différents tests énumérés ci-haut évaluent la vision stéréoscopique de façon statique. Par contre, le monde dans lequel nous évoluons est en mouvement constant et la vision 3D qui en résulte pourrait être différente de celle évaluée par les tests cliniques conventionnels. La stéréoscopie dynamique a été peu étudiée jusqu'ici, et il ne semble exister aucun test clinique commercial permettant de l'évaluer. En 1968, Luria & Weissman ont utilisé un dispositif de Howard-Dolman, dans lequel deux tiges sont visibles par le sujet qui doit déterminer laquelle des deux est la plus proche. Cette version du test permettait le déplacement des tiges devant le sujet en suivant un arc de cercle, à des vitesses variant entre 60 et 180 degrés/seconde. Les résultats de cette étude démontrent que le taux d'erreur augmente plus la vitesse est élevée. Également, la corrélation entre les performances en

condition statique et dynamique diminue lorsque la vitesse augmente (16). Dans les années 80, Zinn & Solomon ont élaboré un test utilisant quatre cibles : le temps nécessaire au sujet pour distinguer la cible la plus proche était mesuré, alors que les cibles s'approchaient du sujet. Le temps mesuré n'était pas corrélé aux acuités stéréoscopiques évaluées grâce au *TNO* et au *Titmus* (17). La stéréoscopie dynamique a également été étudiée par Sachsenweger, qui a conclu que les acuités stéréoscopiques dynamique et statique n'étaient pas corrélées. Aussi, la stéréoscopie dynamique était affectée par le vieillissement, mais pas par le sexe. (18). Plus récemment, Tidbury & al ont utilisé un seul test en condition statique et dynamique pour évaluer les deux types de stéréoscopie. Ils ont obtenu des seuils de perception de la stéréoscopie plus bas lorsque des disparités dynamiques étaient utilisées, contrairement aux disparités fixes. Ces résultats pourraient expliquer pourquoi certains patients n'ayant aucune stéréoscopie mesurable aux tests cliniques standards rapportent percevoir un effet de profondeur lors de visionnement de films en 3D, par exemple (19).

## **1.5 Analyse cérébrale de la stéréoscopie**

La perception de profondeur, bien qu'elle ne nécessite aucun effort conscient, est le résultat de processus neuronaux complexes impliquant plusieurs zones corticales ayant chacune une fonction bien précise. Tout d'abord, la lumière captée par la rétine est acheminée jusqu'au corps genouillé latéral, où les cellules ganglionnaires font synapse. Les neurones du corps genouillé latéral transmettent ensuite l'information visuelle jusqu'au cortex visuel primaire (V1). Les premières cellules binoculaires, donc répondant à l'influx provenant d'un œil ou de l'autre, sont retrouvées dans V1, plus particulièrement dans les couches II/III. La mise en commun de l'information provenant des deux yeux commence à cet endroit (20). Les neurones de l'aire visuelle primaire sont en majorité sensibles à la disparité horizontale (20). L'influx visuel continue alors vers l'aire visuelle V2 et une analyse différente de l'information stéréoscopique s'y fait (21). Les voies dorsales et ventrales sont ensuite parcourues par l'influx visuel, et des processus distincts y prennent place. La stéréoscopie analysée par la voie dorsale permettrait l'orientation dans l'espace et la localisation spatiale. La voie ventrale, elle, supporterait l'analyse de la forme tridimensionnelle d'un objet (22). Toutes ces structures sont essentielles à la création de l'effet stéréoscopique.

## **1.6 Utilité de l'effet stéréoscopique**

L'impression de profondeur telle que nous la percevons provient de l'analyse de la disparité rétinienne, mais également de plusieurs indices monoculaires. Ces indices sont par exemple la superposition ou l'occlusion d'un objet sur l'autre, la perspective et la luminance plus importante d'un objet rapproché (23). L'un des indices les plus importants dans l'analyse de la profondeur est la parallaxe du mouvement. Un objet en mouvement créera un déplacement de l'image sur la rétine; plus l'objet est proche, plus le déplacement sera important (23). La parallaxe du mouvement serait même aussi efficace que la stéréoscopie pour juger des distances (23). Avec tous ces indices monoculaires, il est normal de se demander dans quelle mesure le cerveau utilise l'information stéréoscopique. L'impact de la vision binoculaire a été étudié entre autres par O'Connor & al, qui ont demandé à trois groupes différents d'effectuer certaines tâches de motricité fine en condition monoculaire et binoculaire. Les trois groupes étaient séparés selon leur niveau d'acuité stéréoscopique, soit normale, réduite et nulle. Les performances du groupe avec acuité stéréoscopique normale étaient grandement supérieures à celle du groupe sans vision 3D. De plus, les performances en condition binoculaire étaient supérieures à celles en condition monoculaire pour le groupe avec vision stéréoscopique complète. Ces résultats démontrent un apport significatif de la vision binoculaire lors de l'exécution d'une tâche de motricité fine (24). Également, la précision lors d'un déplacement avec obstacle est améliorée par l'ajout de l'effet stéréoscopique (25), tout comme le contrôle du mouvement pour s'emparer d'un objet (26).

## **2 Le système visuel de l'enfant**

### **2.1 Le développement des fonctions visuelles**

Le système visuel de l'enfant est encore immature à la naissance, et les différentes fonctions visuelles se développent à des rythmes différents. À la naissance, l'alignement oculaire est pauvre et l'âge auquel la majorité des enfants sont orthophores varie entre 4 et 12 semaines selon les études (27, 28). Les premières évidences de binocularité, autant la fusion sensorielle que la convergence fusionnelle, sont présentes dès 3 mois (27). Les

poursuites et les saccades se développent également dans les premiers mois de la vie et une grande amélioration de la précision des poursuites s'effectue entre le 3<sup>e</sup> et le 5<sup>e</sup> mois (29). L'acuité visuelle du jeune enfant est faible et se développe progressivement pour atteindre le niveau adulte vraisemblablement entre 4 et 6 ans (2, 4, 30). La sensibilité aux contrastes connaît un développement encore plus lent, alors que le niveau adulte est atteint beaucoup plus tard. Les différentes études diffèrent sur l'âge exact où le niveau adulte est atteint, celui-ci variant de 7 à 10-19 ans (30). Une amélioration de la sensibilité aux contrastes a même été mesurée jusqu'à 18-29 ans (31). L'accommodation du nourrisson atteint le niveau adulte dès 3 mois, et déjà le système visuel jumèle les fonctions accommodation et convergence en condition binoculaire (32, 33). Ainsi, en condition monoculaire, le système accommodatif des jeunes enfants ne répond qu'au flou rétinien et le contrôle des vergences n'est influencé que par la disparité rétinienne. En binoculaire par contre, la combinaison de ces deux signaux sensoriels permet une plus grande précision de l'accommodation et des vergences.

La perception de différents stimuli visuels progresse à des rythmes différents également. Les stimuli de 1<sup>er</sup> ordre sont caractérisés par une variation de luminance alors que les stimuli de 2<sup>e</sup> ordre impliquent une variation de contraste, de texture ou de profondeur (34). Les stimuli de 1<sup>er</sup> ordre sont les premiers à être perçus en bas âge, tandis que la sensibilité aux stimuli de 2<sup>e</sup> ordre mature plus lentement (35). Cette séquence de maturation peut s'expliquer par les processus corticaux plus complexes impliqués dans la détection d'un stimulus de 2<sup>e</sup> ordre. En effet, les stimuli de 1<sup>er</sup> ordre activent le cortex visuel primaire V1 ainsi que V5, alors que les stimuli de 2<sup>e</sup> ordre impliquent, en plus de V1 et V5, des zones additionnelles du cortex extrastrié telles que V3 et V4 (36).

La sensibilité au mouvement est encore en développement chez les enfants d'âge préscolaire. La sensibilité à un stimulus défini par le mouvement (*motion-defined form*) se développe plus rapidement pour les vitesses élevées, où le différentiel entre le mouvement à l'intérieur de la forme et le fond est plus élevé, et donc la forme plus visible. À basse vitesse, le niveau adulte est atteint à seulement 7 ans, alors qu'un niveau adulte est mesurable à 4-6 ans pour les hautes vitesses (37). Finalement, la perception d'une



différence de vitesse entre deux cibles est encore immature à 5 ans, en particulier pour les basses vitesses (38).

## **2.2 La stéréoscopie chez l'enfant**

### **2.2.1. Développement**

La stéréoscopie, bien qu'absente à la naissance, se développe dans les premiers mois de vie. En effet, il est possible de mesurer un certain degré de stéréoscopie chez les nourrissons dès quatre mois (39-41). Plusieurs chercheurs ont étudié le développement de la stéréoscopie chez les enfants, pour déterminer l'âge auquel le niveau adulte est atteint. Giasci et al ont obtenu des performances de niveau adulte chez des enfants de 4 ans en utilisant des disparités grossières avec leur test de stéréoscopie informatisé. Lorsque les disparités fines étaient utilisées par contre, des performances de niveau adulte n'étaient toujours pas atteintes à 14 ans (41). Fox et al, en utilisant la profondeur réelle pour évaluer la stéréoscopie, ont mesuré une augmentation marquée de l'acuité stéréoscopique jusqu'à 3 à 5 ans, âge auquel les performances étaient pratiquement similaires à celles d'adultes (42). Leat et al ont mesuré une amélioration des performances au test de *Frisby* et *Randot Stereotest*<sup>®</sup> jusqu'à l'âge de 7 ans, alors qu'une acuité stéréoscopique semblable aux adultes était obtenue. Une amélioration était toutefois mesurable jusqu'à 9 ans en utilisant le Moving Dynamic Random Dot Stereotest (MDRS) (le MDRS présente une cible en mouvement sur un fond de points aléatoires dynamique) (43). Il apparaît donc difficile de déterminer avec précision le moment où l'acuité stéréoscopique atteint un niveau adulte, mais il est certain qu'une progression importante de la vision stéréoscopique s'effectue chez les enfants d'âge préscolaire (2, 41-45).

De façon similaire à O'Connor & al, Alramis et son équipe ont évalué comment la binocularité aidait dans l'exécution de tâches complexes de motricité fine (46). Trois groupes de sujets enfants (5 à <7 ans, 7 à <10 ans et 10 à 13 ans) et un groupe adulte devaient effectuer deux tâches différentes, en condition binoculaire et monoculaire. Chez tous les sujets, le temps d'exécution en binoculaire était plus court que celui en

monoculaire, confirmant donc l'impact positif de la stéréoscopie et des vergences dans l'exécution de tâches complexes, et ce même pour les jeunes enfants. La tâche la plus complexe était aussi associée à une plus grande amélioration de performance grâce à la binocularité. Également, l'acuité stéréoscopique expliquait 9,8% de la variance de la sommation binoculaire (soit l'avantage dû à la binocularité), alors que l'âge ne pouvait y être corrélé. De façon surprenante, leurs résultats indiquent une plus grande différence entre les conditions monoculaire et binoculaire pour les enfants ayant une moins bonne stéréoscopie. Les adultes et les enfants ayant une stéréoscopie semblable aux adultes semblaient donc moins dérangés par l'absence de stéréoscopie durant la condition monoculaire. Les auteurs concluent ainsi que la stéréoscopie est nécessaire dans le bon développement de la motricité fine; les enfants ayant une meilleure acuité stéréoscopique développent davantage leurs habiletés motrices et performant mieux, même en condition monoculaire.

### **2.2.2. Déficit de stéréoscopie**

Le développement de la vision stéréoscopique est possible lorsqu'une vision binoculaire normale est présente, c'est-à-dire lorsque les deux yeux perçoivent de façon simultanée une image semblable. Un déficit de stéréoscopie peut être causé principalement par une amblyopie, un strabisme ou une erreur de réfraction significative (47-49). Des lésions au cortex inféro-temporal (voir ventrale) ou au cortex pariétal (voir dorsale) peuvent aussi nuire à la perception des indices stéréoscopiques (50). L'acuité stéréoscopique mesurée cliniquement varie selon le type d'atteinte, mais elle peut être légèrement diminuée à complètement absente (47). Chez les sujets ayant un microstrabisme, par exemple, une acuité stéréoscopique diminuée peut être mesurée à l'aide de stéréogrammes à contours définis, alors que les stéréogrammes à points aléatoires ne sont généralement pas perçus (13). Pour entraîner une diminution des capacités stéréoscopiques, ces troubles de la vision binoculaire doivent apparaître en jeune âge, soit avant la fin de la période critique. Cette période critique, ou sensible, correspond à la période où une anomalie dérange le développement normal de la vision (2, 4, 44). Par exemple, un strabisme affectera le développement de la stéréoscopie s'il apparaît entre 2 mois et presque 5 ans (44). La période critique correspond également à la limite où un traitement pourra rétablir une vision

binoculaire normale, ou presque normale (2, 4, 44). Bien que l'efficacité des différents traitements soit supérieure en jeune âge, la période critique n'est maintenant plus considérée comme terminée vers six ou sept ans. En effet, la plasticité cérébrale tardive permettrait une amélioration des fonctions visuelles même à l'âge adulte (4, 51, 52). Malgré des traitements commencés en bas âge, les enfants atteints d'amblyopie ne récupèrent habituellement pas une acuité stéréoscopique aussi bonne qu'un enfant sans trouble de vision binoculaire (49).

### **3 Le système visuel de l'âgé**

#### **3.1 Vieillessement du système visuel**

Le vieillissement normal entraîne une dégénérescence de pratiquement toutes les composantes du système visuel primaire (36, 53). L'illumination rétinienne est diminuée par le myosis pupillaire et la diminution de transparence du cristallin (même en l'absence d'un diagnostic de cataracte). Au niveau rétinien, plusieurs éléments subissent une altération de leurs structures. Par exemple, le nombre de bâtonnets diminue lors du vieillissement alors que les cônes restent intacts (54). Cette dégénérescence physiologique entraîne également une perte de plusieurs fonctions visuelles, dont une diminution d'acuité visuelle (53). L'acuité visuelle atteindrait même un sommet à 29 ans pour graduellement diminuer jusqu'à 75 ans (55). La sensibilité aux contrastes est elle aussi diminuée chez les âgés, particulièrement pour les fréquences spatiales moyennes et élevées (53). Ainsi, plus la fréquence spatiale augmente, plus le déficit est important (56). La perception des couleurs change durant le vieillissement, diminuant ainsi la capacité de discrimination chromatique (57). La cause de cette détérioration de perception des couleurs reste controversée; différents auteurs affirment qu'elle est due à la dégénérescence des structures oculaires alors que d'autres l'imputent à un phénomène cortical (36, 57). La sensibilité au mouvement est aussi affectée par l'âge, et ce pour plusieurs aspects de la perception et la discrimination de la vitesse (58). Également, la perception des stimuli de 2<sup>e</sup> ordre est davantage affectée par le vieillissement que celle de 1<sup>er</sup> ordre, en raison du processus cortical plus complexe nécessaire à l'intégration. La sollicitation de réseaux corticaux plus

étendus face à un stimulus de 2<sup>e</sup> ordre met davantage en évidence les altérations des fonctions visuelles (34). Finalement, la sommation binoculaire, soit l'intégration de l'information provenant de chaque œil, semble diminuée chez les âgés (53). La cause de ce dépérissement du processus visuel n'est pas encore bien comprise, mais l'altération des structures oculaires semble impliquée, en plus de la dégénérescence des voies visuelles et de l'intégration corticale. Les structures neuronales responsables du décodage visuel ne sembleraient pas altérées dans leur structure mais plutôt dans leurs fonctions. Cette réorganisation neuronale entrainerait une détérioration de plusieurs autres fonctions du système nerveux (53).

### **3.2 La stéréoscopie chez l'âgé**

Il est maintenant bien établi que l'acuité stéréoscopique est diminuée chez les adultes âgés (11, 14, 15, 59-62). En 1992, Wright & Wormald ont démontré une nette diminution de stéréoscopie chez les personnes âgées de 65 ans et plus en utilisant le test de *Frisby*. Cette perte de stéréoscopie était retrouvée même chez les sujets ayant une acuité visuelle de 6/6. Ces auteurs ont donc associé la perte de stéréoscopie à une dégénérescence neuronale plutôt qu'à un facteur oculaire (60). Quelques années plus tard, Haegstrom-Portnoy, Schneck & Brabyn ont également constaté une baisse de stéréoscopie avec l'âge chez plus de 900 sujets, conjointement à une diminution de plusieurs autres fonctions visuelles (par exemple la sensibilité aux contrastes, la résistance à l'éblouissement, le recouvrement à l'éblouissement) (14). Par contre, l'analyse de ces données a permis d'associer la diminution de stéréoscopie à une perte d'intégrité de la grille d'Amsler et une dégradation de la résistance à l'éblouissement et du recouvrement à l'éblouissement. Ces résultats suggèrent ainsi une contribution des structures oculaires dans la perte de stéréoscopie, plutôt qu'une dégénérescence corticale (61). Zaroff, Knutelska & Frumkes ont recensé les études antérieures sur le sujet, pour tenter de pallier aux lacunes présentes dans ces études. En établissant une acuité visuelle monoculaire minimale de 6/9, ils ont observé un taux plus élevé de déficit de stéréoscopie avec l'âge en plus d'une augmentation de la sévérité des déficits. La relation entre la diminution de la stéréoscopie et l'âge serait aggravée après 60 ans, le processus étant probablement cérébral (15). Une autre équipe s'est attardée au seuil

de corrélation interoculaire, soit le nombre minimal de points corrélés dans un stéréogramme à points aléatoires pour percevoir l'effet de profondeur. Ce seuil augmente chez les sujets de plus de 65 ans, diminuant leur capacité à percevoir l'effet stéréoscopique d'un stimulus présentant moins de corrélation interoculaire (59). Bien que la cause de la diminution de stéréoscopie soit encore incertaine, il est clair que l'acuité stéréoscopique est diminuée chez les personnes de 65 ans et plus, et ce en l'absence de pathologie oculaire active.

## **4 3D-MOT**

### **4.1 Présentation**

Les premières études sur le MOT (*Multiple Object Tracking*) remontent à Pylyshyn & Storm, en 1988. Ces auteurs ont prouvé qu'il était possible de suivre un certain nombre de cibles, dans un ensemble d'éléments semblables en mouvement (63). Le 3D-MOT (*3D-Multiple Object Tracking*) utilise une version modifiée, alliant le MOT et l'effet stéréoscopique. Le programme NeuroTracker™ (Cognisens Athletics Inc.), 3D-MOT développé par Jocelyn Faubert de l'Université de Montréal, est utilisé pour analyser et entraîner les fonctions cognitives de différentes populations. Chez les athlètes, la méthode habituelle d'entraînement repose sur quatre éléments-clés, soient l'attention divisée entre plusieurs cibles en mouvement associée à la tâche au MOT, la stimulation d'un grand champ visuel, la mesure d'un seuil de vitesse et l'effet stéréoscopique (64). Ces caractéristiques reflètent les conditions visuelles lors de la pratique d'un sport d'équipe. Tout d'abord, une tâche au MOT consiste à porter une attention particulière à un sous-groupe d'éléments dans un ensemble d'éléments semblables en mouvements. Ces éléments interagissent entre eux et avec l'espace, c'est-à-dire qu'ils peuvent rebondir l'un sur l'autre, s'occlure ou rebondir sur les parois virtuelles (64). La capacité à suivre des cibles spécifiques dans un ensemble d'éléments est essentielle pour les joueurs d'un sport d'équipe. Les études antérieures ont démontré que le nombre maximal de cibles pouvant être suivies parmi un ensemble de cibles semblables était de quatre ou parfois cinq, selon la population (63). Cette limitation est causée par la demande attentionnelle élevée de la tâche

(65). De plus, l'utilisation d'un grand champ visuel est primordiale pour l'entraînement d'athlètes afin de reproduire l'environnement de jeu. Pour ce faire, le CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*) est utilisé : le sujet est alors placé au centre d'un cube virtuel de 8 pieds carrés. L'attention mise de l'avant par les joueurs doit inclure une constante analyse du champ visuel périphérique, et l'entraînement dans le CAVE permet d'imiter ces conditions (64). Également, la mesure d'un seuil de vitesse comme variable dépendante comporte plusieurs avantages par rapport à la méthode utilisée dans d'autres études, où le nombre maximal d'éléments pouvant être suivis est comptabilisé. Dans ces études, la vitesse est stable durant la séance, et le sujet doit suivre des yeux le maximum de cibles possible (65). Lorsqu'un seuil de vitesse est utilisé, le nombre de cibles à suivre est établi au début de la séance, et la vitesse à laquelle les cibles bougent augmente ou diminue durant la séance selon les performances du sujet. La méthode par seuil de vitesse permet d'obtenir un score beaucoup plus précis puisqu'une échelle de rapport continue est utilisée (64). Finalement, l'effet stéréoscopique intégré au NeuroTracker™ permet un entraînement encore plus complet. Une seule équipe semble avoir mesuré l'impact de l'effet stéréoscopique sur une tâche de MOT. Ainsi, l'ajout de l'effet stéréoscopique améliore les performances en moyenne de 50% chez des participants adultes (64, 66). Un entraînement de plusieurs séances au 3D-MOT permet une augmentation des scores de vitesse, autant chez les athlètes que les non-athlètes. Les scores des athlètes restent par contre plus élevés que ceux des non-athlètes même après l'entraînement (67).

Le 3D-MOT, en plus de permettre l'entraînement d'athlètes, peut améliorer les fonctions cognitives de différentes populations, par exemple les personnes présentant un trouble déficitaire de l'attention, ou simplement les personnes âgées qui souhaitent maintenir leur capacité cognitive. Les fonctions cognitives sollicitées par le 3D-MOT ont été isolées, soient l'attention, la mémoire de travail et la vitesse d'intégration d'informations visuelles. Une amélioration de ces fonctions cognitives suite à un entraînement à cette tâche a été démontrée, corrélée à des changements à l'électroencéphalogramme quantitatif (qEEG). Ces résultats suggèrent donc un possible transfert de l'entraînement au 3D-MOT aux tâches de la vie quotidienne sollicitant les mêmes fonctions cognitives (68). Le 3D-MOT a aussi été étudié dans les cas de commotion cérébrale. En effet, le 3D-MOT sollicite des

fonctions cognitives qui peuvent être affectées lors de commotions cérébrales (mémoire de travail, intégration de l'information visuelle) (64). Ainsi, les performances au 3D-MOT peuvent être diminuées chez les athlètes ayant subi une commotion cérébrale. Leurs performances ont aussi été corrélées aux résultats de certaines évaluations cognitives utilisées lors de commotions cérébrales. Les scores obtenus au SCAT3 (Sport Concussion Assessment Tool 3) et au KDT (King-Devick Test) prédisaient en partie les performances au 3D-MOT : une commotion cérébrale plus importante diminuait les scores au 3D-MOT de façon plus prononcée, et affectait de manière similaire les évaluations cognitives (69).

## **4.2 Le MOT chez l'âgé**

Plusieurs études ont comparé les performances d'adultes âgés à celles de jeunes adultes. Sekuler, McLaughlin & Yotsumoto ont obtenu de meilleures performances chez les jeunes adultes par rapport aux adultes âgés. Les adultes âgés commettaient plus d'erreurs lorsque le nombre de balles était augmenté, le temps de présentation des balles en mouvement prolongé ou la vitesse augmentée (70). Trick, Perl & Sethi ont utilisé une tâche en deux dimensions présentant 10 balles pendant 10 secondes, à des vitesses variables. Ils sont arrivés à la conclusion que les adultes âgés peuvent suivre correctement des yeux 3 de ces 10 balles, contrairement aux jeunes adultes qui réussissent à suivre 4 balles. Ils ont associé cette faiblesse à une dégradation de la mémoire de travail, rendant trop difficile pour les adultes âgés de garder en tête la position de quatre balles (71). Legault, Allard & Faubert ont appliqué le seuil de vitesse comme mesure dépendante, chez des sujets âgés et jeunes qui suivaient 3 puis 4 balles, parmi 9 balles avec effet stéréoscopique. Les sujets âgés étaient capables de suivre des yeux 3 ou 4 balles, mais à des vitesses très réduites pour la deuxième condition. Les performances des adultes âgés pour 3 balles étaient semblables à celle des jeunes adultes qui suivaient 4 balles. La capacité pour les sujets âgés à suivre 4 balles a amené les auteurs à penser qu'un autre facteur, en plus d'une dégradation de la mémoire de travail, était en cause. Cette étude a également démontré que les adultes âgés pouvaient améliorer leur score grâce à l'entraînement, de façon similaire aux jeunes adultes (72). Un effet positif de l'entraînement au 3D-MOT sur la perception du mouvement biologique a également été établi chez les âgés. La perception du mouvement biologique est

évaluée à l'aide d'un marcheur virtuel défini seulement par des points à l'endroit des articulations. La reconnaissance du mouvement biologique est acceptée comme étant primordiale dans un environnement social, mais elle se détériore avec l'âge. Le transfert de l'entraînement du 3D-MOT à cette fonction cognitive est donc intéressant pour le maintien de l'autonomie des adultes âgés (73).

### **4.3 Le MOT chez l'enfant**

Le MOT a également été utilisé pour la population pédiatrique. En effet, les fonctions cognitives sollicitées par le MOT, par l'exemple l'attention ou la mémoire de travail, sont encore en maturation alors que les enfants débutent l'école (74). Il serait donc logique que les performances au MOT progressent à un rythme similaire. En 2005, Trick, Jaspers-Fayer & Sethi ont utilisé une tâche au MOT regroupant 10 éléments en mouvements, avec des enfants de 6, 8, 10, 12 et 19 ans qui devaient suivre de 1 à 4 cibles parmi les 10. Tous les groupes ont été en mesure d'effectuer la tâche tout en gardant leur intérêt. En comparant tous les groupes, une amélioration des performances en fonction de l'âge était présente. Les groupes de 6 et 8 ans étaient en mesure de suivre correctement 2 balles, les groupes de 10 et 12 ans arrivaient à suivre 3 balles et les sujets de 19 ans pouvaient suivre 4 balles (74). Quelques années plus tard, Koldewyn & al ont également mesuré un effet significatif de l'âge sur les capacités au MOT. En utilisant la même tâche chez des enfants ayant un diagnostic de trouble du spectre de l'autisme, ils ont aussi démontré que ces sujets pouvaient suivre un nombre plus limité de cibles au MOT (75).

La majorité des études utilisant le 3D-MOT ont utilisé un dispositif comme le CAVE ou un ordinateur, dans un environnement de laboratoire ou de recherche. Aucune étude ne semble avoir utilisé une version plus portable, sur une tablette, dans le but d'en faire un outil clinique et plus accessible. Également, l'impact de la stéréoscopie sur ce type de tâche a été évalué que chez des participants adultes.



## **5 Objectifs et hypothèses**

Le but de cette étude était d'évaluer l'impact de l'effet stéréoscopique sur les performances au NeuroTracker™ sur tablette en fonction de l'âge. Les performances à la tâche avec et sans effet stéréoscopique ont donc été comparées pour trois groupes d'âge : enfant (7-12 ans), adultes (18-40 ans) et adultes âgés (65 ans et plus)

Nous avons émis l'hypothèse que le groupe adulte aurait des performances supérieures aux autres groupes, et que l'effet stéréoscopique aurait un impact plus important pour ce groupe que pour les autres groupes. Nous avons également postulé que les sujets de tous les groupes d'âge seraient en mesure d'utiliser la tablette et compléter la tâche de 3D-MOT du NeuroTracker™.

## 6 Méthodologie

Cette étude nécessitait la participation de sujets ayant une vision binoculaire normale et aptes à donner un consentement (ou le consentement des parents/tuteurs). Trois groupes de 20 sujets ont été recrutés, soient des enfants de 7 à 12 ans, des adultes de 18 à 40 ans et des personnes âgées de 65 ans et plus. Les sujets devaient avoir une acuité visuelle au loin de 6/7,5 ou mieux dans chaque oeil et de 0,37M en vision de près. Ils devaient aussi correctement identifier les 8 formes du *Randot Stereotest*<sup>®</sup>. Ils ne devaient pas avoir un diagnostic connu de trouble de l'attention ou de développement, ni présenter de pathologie oculaire. Ils ne devaient pas avoir participé à un entraînement au 3D-MOT avant cette étude. Ils devaient également avoir subi un examen visuel complet ou un dépistage visuel dans la dernière année. Le dépistage visuel a été effectué par des optométristes et incluait l'acuité visuelle monoculaire en vision de loin et de près, l'acuité stéréoscopique au *Randot Stereotest*<sup>®</sup>, le test écran, les motilités oculaires, une évaluation de la réfraction et de la santé oculaire.

Le choix du groupe d'âge de 7-12 ans a été influencé par d'autres études qui ont démontré que les enfants de cet âge avaient des performances au 3D-MOT plus basses que les adultes (74, 76). Il est donc intéressant de comparer l'impact qu'a l'effet stéréoscopique sur leurs performances différentes de celles des adultes. Le choix du groupe âgé a également été établi selon des études antérieures, où des adultes âgés de 57 à 89 ans (selon les études) obtenaient des résultats inférieures à de plus jeunes adultes (71, 72). L'âge minimal de 65 ans permettait de comparer nos résultats également aux études portant sur l'évolution de l'acuité stéréoscopique, où une diminution de la sensibilité à la stéréoscopie est notée à partir de 65-75 ans (14, 59-61).

Pour cette étude, le NeuroTracker<sup>TM</sup> a été utilisé. Ce 3D-MOT consiste en 8 sphères identiques présentées en trois dimensions dans un cube virtuel (Figure 4). Les sphères se déplacent dans tous les sens, et peuvent rebondir sur les autres sphères ou les murs du cube virtuel. Le sujet doit suivre des yeux trois de ces sphères pendant un laps de temps donné,

pour ensuite en rapporter la position. Pour une description plus détaillée de la tâche, consulter la section *Methods* de l'article.

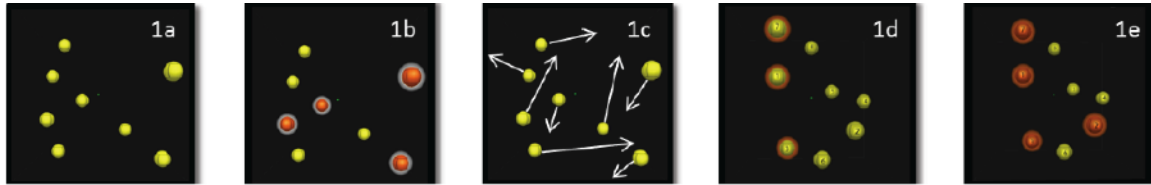


Figure 4 : les étapes de la tâche au MOT

Pour ce projet, deux conditions ont été testées (avec et sans effet stéréoscopique), et chaque condition a été testée par deux procédures en escalier (20 inversions par procédure en escalier soit 6 minutes chacune). Une séance avait donc une durée d'environ 25 minutes (4x6 minutes). L'ordre de présentation des deux conditions était contrebalancé entre les sujets, pour annuler l'effet d'entraînement possible. Pour s'assurer que les enfants et les adultes âgés puissent effectuer la tâche tout au long de la séance, trois balles étaient identifiées au début de la tâche et devaient être suivies par le sujet. Une courte vidéo de présentation était également diffusée au début de la séance. L'effet stéréoscopique était créé par anaglyphe grâce à des lunettes bleu-rouge : l'œil droit portant le filtre bleu et l'œil gauche portant le filtre rouge. La tablette *ASUS Tablet* a été utilisée pour afficher la tâche, à une distance d'observation de 40 cm, en position assise et en lumière ambiante sans éclairage direct sur la tablette. Pour une description plus détaillée de la procédure en escalier utilisée et de la tablette, consulter la section *Methods* de l'article.

## **Chapitre 2 : Article**

### **Effect of age and stereopsis on a multiple-object tracking task**

Manuscrit à soumettre pour publication au journal PLOS ONE

# **Effect of age and stereopsis on a multiple-object tracking task**

Marjolaine Plourde <sup>1¶</sup>, Marie-Eve Corbeil <sup>2¶</sup> & Jocelyn Faubert<sup>1¶</sup>

<sup>1</sup> Visual Psychophysics and Perception Laboratory, School of optometry, University of Montreal, Montreal, Quebec, Canada

<sup>2</sup> School of optometry, University of Montreal, Montreal, Quebec, Canada

¶These authors contributed equally to this work

This work was supported by NSERC and the NSERC-Essilor Industrial Research Chair.

## **Abstract**

**PURPOSE:** 3D vision develops during childhood and tends to diminish after 65 years of age. It is still relatively unknown how stereopsis is used in more complex/ecological contexts such as when walking about in crowds where objects are in motion and occlusions occur. One task that shares characteristics with the requirements for processing dynamic crowds is the multiple object-tracking task (MOT). **METHODS:** In the present study we evaluated the impact of stereopsis on a MOT task as a function of age. A total of 60 observers consisting of three groups of 20 subjects (7-12 years old, 18-40 years old and 65 years and older) completed the task in both conditions (with and without stereoscopic effects). **RESULTS:** The adult group obtained the better scores, followed by the children and the older adult group. The performance difference between the stereoscopic and non-stereoscopic conditions was significant and similar for the adults and the children ( $p < 0,05$ ) but was non significant for the older observers. These results show that stereopsis helps children and adults accomplish a MOT task, but has no impact on older adults performances. **CONCLUSION:** The present results have implications as to how populations differ in their efficiency of using stereoscopic cues for disambiguating complex dynamic scenes.

## Introduction

The three-dimensional sensation obtained when observing the real world is in great part provided by the fact that both eyes have a slightly different perspective of the world. This slightly different view from each eye (disparity) is used by the brain to generate the strong depth sensation we observe, known as stereopsis. Although the role of stereopsis for generating depth perception is well known and was demonstrated in the seminal studies by Julesz, the emphasis has been primarily on static cues (1). Yet our world is in motion and the role of stereoscopic mechanisms for perceiving depth for naturally occurring dynamic scenes is still relatively unknown. However, when we assess binocular depth perception in clinics, we only use static measures that require fine spatial resolution. Recent studies have implied that stereopsis can play a facilitation role in dynamic conditions such as when someone tracks multiple moving objects (2). In fact studies have shown that speed thresholds in a multiple object tracking task (MOT) can be improved up to 50% (3) and that when objects occlude in the scene stereoscopic cues can improve speed thresholds by a factor of 3 (4). Therefore, stereopsis can play a significant role in dynamic stimuli yet we have no knowledge at present on how age differences influence this capacity.

Stereopsis is not stable throughout life. A certain level of stereopsis can be measured in infants as early as 4 months of age (5-7). Binocular vision then matures during childhood and the measured stereoacuity reaches the adult level between 4 years of age and up to 9 or 14 years of age, depending on the test used (7-9). Leat & al (9) obtained adult level stereoacuity at 7 years of age with the Frisby Test and the Randot Stereotest®, two stereotests widely used by eye care professionals. Stereopsis is also affected by aging, and tends to deteriorate after 65 years of age, even with healthy, nonpathological, aging eyes (10-12). Normal aging not only diminishes stereopsis, but also affects the processing of other second order stimuli (13). The solicitation of these more complex neuronal processes further demonstrates alterations of visual functions with age (14).

In this study, we used the NeuroTracker™, a three-dimensional multiple object tracking (3D-MOT) task developed by one of the author, Jocelyn Faubert of University of Montreal (3). A classic 3D-MOT training includes 4 characteristics: MOT, a large visual field, speed thresholds and stereoscopy (3). Several training sessions in these conditions improve the performances of almost any populations, from professional athletes to healthy elderly (3, 15). In addition to reflecting a sport environment, 3D-MOT recreates a dynamic requirements similar to our everyday environment. With a paediatric population, the task parameters have to be adjusted: younger children can follow fewer targets compared to adults. Trick, Jaspers-Fayer & Sethi (16) measured lower performances in children up to 19 years of age. Decreased performances also occur with aging, and seniors have more difficulty following more than 3 targets. When speed threshold is used, older adults following 3 targets have similar results as young adults following 4 targets (17). Knowing that stereoscopic cues improve the performances of adults on a MOT task and that children and older observers might not have complete stereopsis like adults, it is interesting to evaluate how stereopsis helps younger children and older adults accomplish this task. Furthermore, it has been demonstrated that aging reduces speed thresholds for the 3D-MOT task (15), yet it remains unresolved to what extent the decreased performance of the older adults is due solely to a reduction of higher-level cognitive functions solicited by the MOT component of the task or is compounded by the reduced effectiveness of the stereoscopy gain normally observed when performing this task in young healthy adults.

The goal of this study was to assess the impact of age and stereoscopy on a MOT task, by using the portable version of the NeuroTracker™. Our primary hypothesis is that the adult group would have the best average results, and would benefit the most from the addition of stereoscopic effect. Our secondary hypothesis is that the reduced mean performances of the older observers would be the result of both a reduction of cognitive skills required to track multiple moving objects in addition to a reduced benefit of the stereoscopic cues used to disambiguate the elements during the task.



## **Methods**

### **Participants**

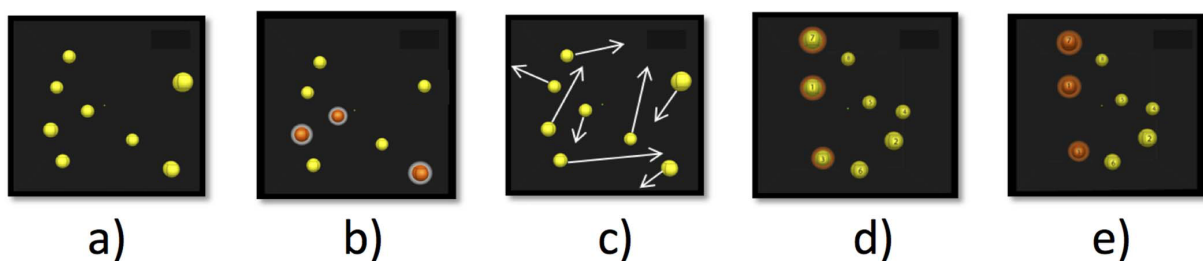
Three groups of 20 subjects were recruited: children (7-12 years old), adults (18-40 years old) and older adults ( $\geq 65$  years old). The subjects were recruited in different areas of Montreal, through 3 different optometry clinics. Eleven subjects from the kids group were recruited at an elementary school in Laval, after a visual screening. All participants underwent a comprehensive eye exam or vision screening in the previous year. The vision screening was done by optometrists and included an evaluation of the visual acuity, binocular vision, refraction and eye health. They all had monocular distance visual acuity of 20/25 or better and monocular near visual acuity of 0,37M with their habitual correction (if necessary). They had to correctly identify the 6 shapes of the Randot Stereotest®, and their stereoacuity measured with the circles was recorded. Participants were excluded if they had a diagnosis of development disorder or attention deficit, or if they presented an ocular pathology. Participants were also excluded if they had already been trained with 3D-MOT. All participants agreed to this study and completed the informed consent form before the beginning of the session. This research was approved by the ethic committee CERES (Comité d'éthique de la recherche en santé) of University of Montreal.

### **Stimuli and procedure**

The 3D-MOT used in this research consisted of 8 spheres moving in a virtual cube (fig 1). At first, the 8 spheres were yellow (presentation phase, fig 1a), and then three of them turned red for 1 second (indexing phase, fig 1b). All 8 spheres returned to their original yellow color and began to move in all directions (X, Y and Z) in a virtual 3D cube (movement phase, fig 1c). They bumped and occluded each other or bounced off the walls of the cube. After 6 seconds, the spheres stopped and the subject had to identify the three targets selected at the beginning of the trial (identification phase, fig 1d). Finally, a feedback was given to the subject by highlighting the three initial targets (fig 1e). The thresholds were obtained using a one up one down staircase procedure (18). The trial always started at an arbitrary speed value of 1 (1 NeuroTracker™ unit represents 68 cm/s in virtual speed); if the subject correctly pointed out

the 3 targets, the speed increased by 0.05 log units; if he made a mistake, it slowed down by the same proportion, resulting in a threshold criterion of 50%. The staircase was interrupted after twenty inversions and the threshold was calculated by the mean speed of the last four inversions.

For this research, two conditions were tested (with and without stereopsis), and 2 thresholds were obtained for each condition, by 2 separate staircase procedures. The mean of these two staircases was considered as the subject's performance for this condition. The total duration of the session was approximately 25 minutes. The order of the two conditions was counterbalanced between subjects to cancel the effect of training. The number of targets, three, was chosen to make sure that all participants could perform the task without losing interest during the session. A short presentation video explained the procedure before the session. The stereoscopic effect was created by anaglyph and subjects wore red-blue glasses on top of their habitual correction. The stereopsis condition showed a disparity range from 0 to 150 seconds of arc depending on the actual sphere position in the virtual cube. The portable version of the 3D-MOT was tested by using a tablet to display the 3D-MOT. The tablet used was a ASUS Transformer Book T100TAM, a 10.1" Windows tablet (1366 x 768 pixels). All participants were seated at a fixed 40 cm viewing distance, under ambient light.



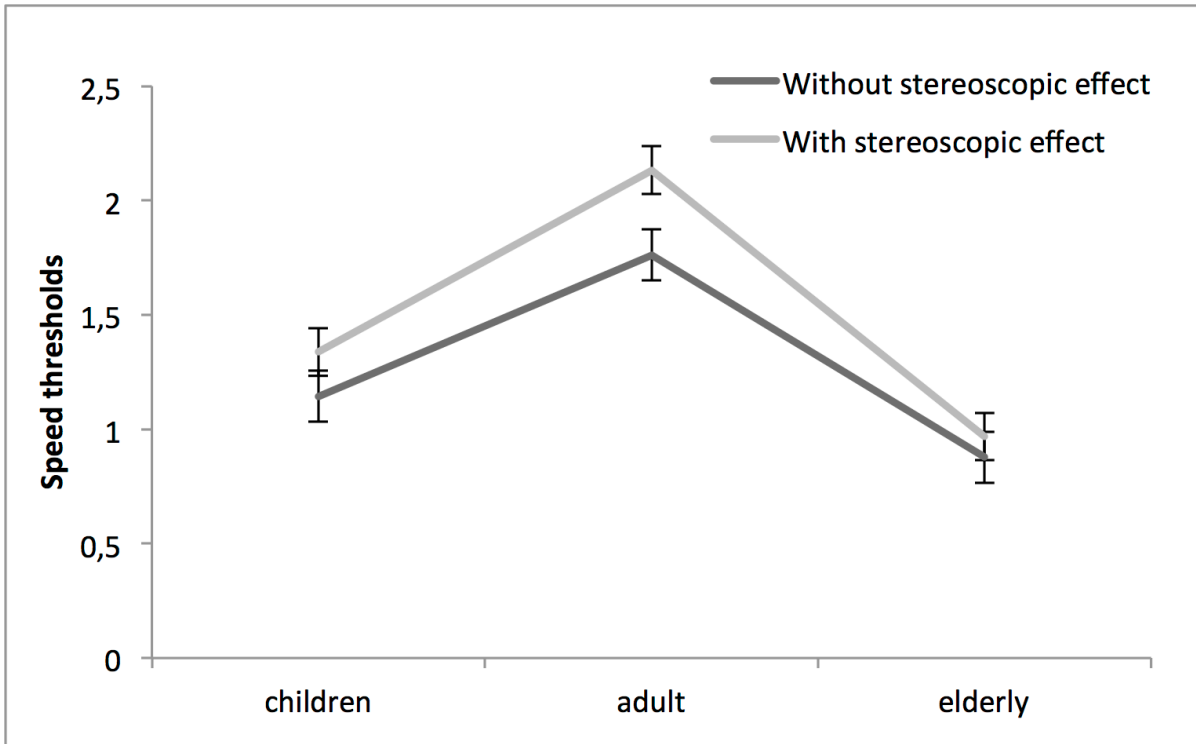
**Fig 1. Five steps of the 3D-MOT task (a) presentation phase where 8 spheres are shown in a 3D volume space, (b) indexing phase where 3 spheres (targets) change colour (red) and are highlighted (hallo) for 1 second, (c) movement phase where the targets indexed in stage b return to their original form and colour and all spheres move for 6 seconds crisscrossing and bouncing off of each other and the virtual 3D volume cube walls that**

are not otherwise visible, (d) identification phase where the spheres come to a halt and the observer has to identify the 3 spheres originally indexed in phase (b). The spheres are individually tagged with a number so the observer can give the number corresponding to the original targets, and (e) feedback phase where the subject is given information on the correct targets (19).

## Results

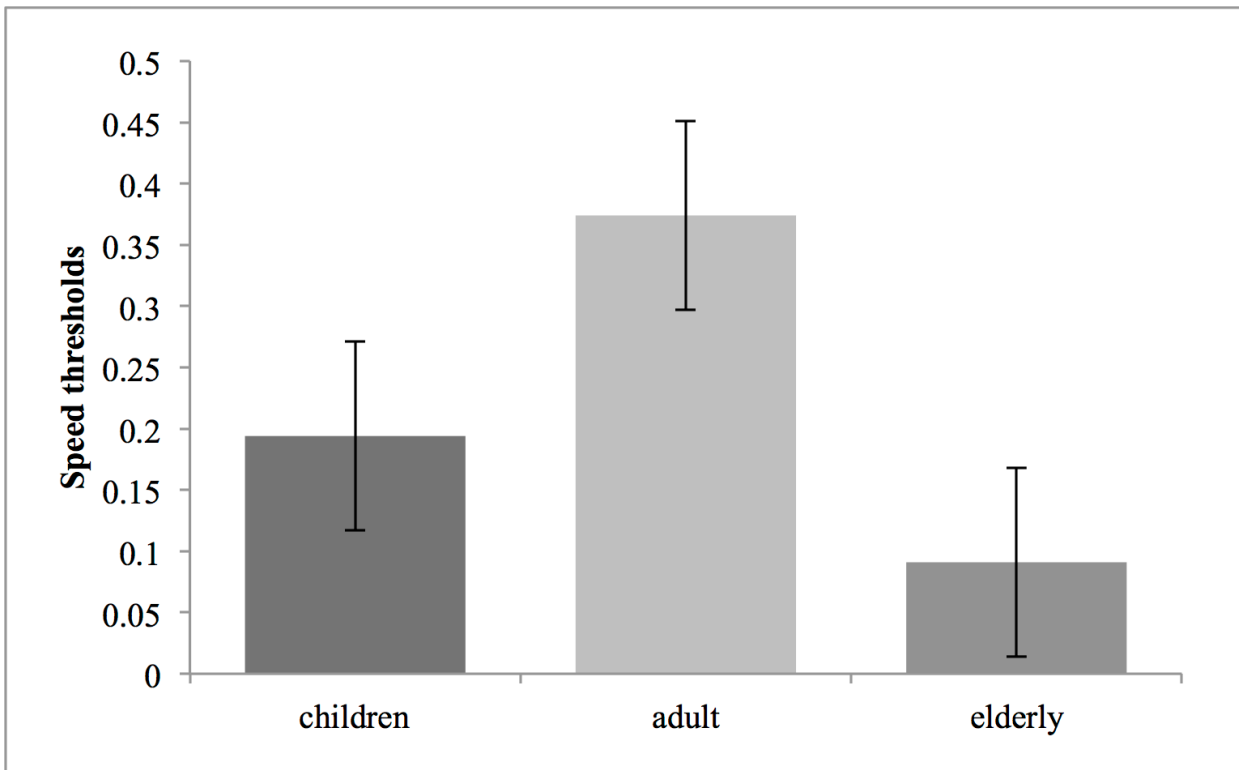
All 60 subjects were able to complete the task on the portable version of the 3D-MOT. The mean age for the children was  $7,95 \pm 1,36$  years (range : 7-12), adults  $26,20 \pm 3,49$  years (range : 22-37) and older adults  $69,05 \pm 4,57$  years (range : 65-77). The children group obtained a mean stereoacuity (measured with the circles of the Randot Stereotest®) of  $24,50 \pm 5,60$  arc seconds, the adult group  $22,50 \pm 3,44$  arc seconds and the elderly group  $94,00 \pm 86,84$  arc seconds.

The average score for each condition and group is shown in fig 2. A mixed ANOVA confirms the significant impact of age ( $F(2,57) = 27,063$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = .487$ ), stereoscopic effect ( $F(1,57) = 24,259$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = .299$ ), and age by stereopsis interaction ( $F(2,57) = 3,408$ ;  $p < 0,05$ ;  $\eta^2 = .107$ ). A post-hoc analysis (Fisher LSD) shows a significant difference between the adult and children group ( $p < 0,01$ ), between the adult and elderly group ( $p < 0,01$ ) and finally between the children and elderly group ( $p < 0,05$ ). The average performances (mean of both conditions) for the adult group are higher than those of the children group, which are higher than those of the elderly group.



**Fig 2. Scores with standard errors for each condition and group.**

The difference scores between the stereoscopic and non-stereoscopic conditions are also different between groups. These score differences, which we will call the stereopsis advantage, are shown in fig 3. The adult group had a difference score of 0,374 ( $\pm 0,077$ ), versus 0,194 ( $\pm 0,077$ ) for the children group and 0,091 ( $\pm 0,077$ ) for the elderly group. T tests with Bonferroni correction confirm the significant differences between both conditions for the adult group ( $t(19) = 3,875$ ;  $p=0,001$ ) and the children group ( $t(19) = 2,938$ ;  $p=0,008$ ). This difference is non-significant for the elderly group. A one-way ANOVA considering the stereopsis advantage is statistically significant  $F(2,59): 3,453$  ( $p<0,04$ ). A post-hoc Fisher LSD shows a significant difference between the adult and elderly group only ( $p<0,05$ ): the performances improvement associated with stereopsis is diminished in elderlies, compared to adults. Therefore, the stereopsis advantage is greater in adults and similar with kids, but is almost zero for older adults.



**Fig 3. Score differences between both conditions (stereopsis advantage) with standard errors for each group.**

When trying to correlate the 3D-MOT scores to the Randot Stereotest® stereoacuties, only the older adult group can be considered. Indeed, a majority of the adult and children group have reached the maximum stereoacuity of 20 seconds of arc measurable with this test. The Randot Stereotest® stereoacuties for the older adult group are not significantly correlated to the 3D-MOT scores ( $r = -0,112 \pm 0,638$ ), which suggest that these two tasks do not measure the same stereoscopic processing.

## Discussion

To our knowledge, this research is the first to evaluate stereopsis influence on MOT performances in 3 age population groups from childhood to older age. The average MOT results (mean of both conditions) confirm the progression of the performances in a MOT task in school-aged children. As argued by Trick, Jaspers-Fayer & Sethi (16) and Koldewyn & al (20), a significant difference between the adult and children mean performances could be related to an evolution of attention, working memory and visual information processing speed, functions involved in MOT. The lower mean performances in the older adult group, which support the results of several other studies (15, 21, 22), may indicate deterioration of these same functions. However, the present results clearly demonstrate that the aging effect observed in the 3D-MOT scores also emanates from a loss of the stereoscopic advantage that the other groups younger groups benefit from.

The comparison between scores with and without stereoscopic effect allows us to directly evaluate the stereopsis advantage. The non-significant impact of stereoscopic effect on the elderly's results does not directly relate to their lower depth sensitivity recorded at the Randot Stereotest®, as the results of the Randot and 3D-MOT are not correlated. The lack of improvement by the addition of stereoscopic effect could be related to a different use of stereoscopic information that also changes with age. As we know, normal aging affects perception of second order stimuli to a greater extent than first order stimuli (14). It was suggested that second order stimuli (stereopsis is also a second order process) require more complex networks for efficient processing and that these are particularly affected by the normal aging process (13). The lack of stereopsis advantage in the elderly group may be due to this alteration of second order stimuli processing, resulting in a reduced ability to efficiently use stereoscopic cues in a dynamic stimulus such as in 3D-MOT.

The higher performances in stereoscopic condition were anticipated for the adult and children group. O'Connor & al (23) and Alramis & al (24) demonstrated the advantage of binocularity in fine motor tasks, for adults and children respectively. What is more surprising here is the

absence of significant difference in the stereopsis advantage between the adult and children group. Indeed, several other teams showed a progression in stereopsis from childhood to teenage years. Giaschi & al (7) recorded lower performances up to 14 years old with fine disparity, using their computerized stereotest. With the Randot Stereotest®, we obtained similar stereoacuties for children and adult, confirming the results of Leat & al (9). The 3D-MOT task used in this study shows disparity from 0 to 150 seconds of arc. We hypothesised that both children and older adults may have a reduced benefit from stereopsis but for different reasons. The children because the stereopsis processing mechanisms may not be yet mature and the older observers because the efficiency, given that it is a second order process, may be reduced by aging. Our results only support the latter. Nevertheless, a trend is still visible between the children and adult stereopsis advantage: the development process may not be totally complete in 7-12 years old children. With even younger subjects the stereopsis advantage may be significantly different from young adults.

Another explanation for the similar stereopsis advantage measured in the children and adult group could be the different nature of the 3D used in a 3D-MOT task, which represents dynamic stereopsis. This type of stereopsis might not develop at the same rate as static stereopsis. To our knowledge, no other study has evaluated the development of dynamic stereopsis in children. This stereopsis may have reached adult levels at 7 to 12 years of age and be diminished by 65 years old. This type of 3D might better reflect our everyday use of stereopsis. A weak, even null, correlation between dynamic and static stereoacuity has been documented before (25, 26). More recently, Tidbury & al (27) showed that dynamic disparities were more effective for generating depth perception than static ones.

One bias of the present study is the small number of subjects in our groups, and the small recruitment area. Therefore our results can only be applied on similar population and may not be generalised to the entire population. Another limitation is the more compact instrumentation used, compared to previous studies where a much larger virtual environment was used (3, 15, 28). The smaller screen limits the visual field and the range of disparity that can be displayed. Using a wider screen, the stereoscopic advantage for every group could possibly be higher. In fact, with a larger and more immersive environment, the addition of

stereoscopic effect improved the scores of adults by 50%, against 21% for our adult group (28). Using a wider screen could reveal a significant impact of stereopsis on the senior group results, by showing even coarser disparities. However, the portable version is usable with any age group, and may become a tool for home training or clinical evaluation, in assessing a more dynamic use of stereopsis. This different type of stereoscopy may be useful in assessing daily activities like driving. Further studies are needed to establish the parameters of such clinical or training tools.

## **Conclusion**

The portable version of the NeuroTracker™ is easily usable with older observers as well as with kids. The adults perform better than children and older adults, and adults and children benefit equally from the addition of stereoscopy for this MOT task.

## **Acknowledgments**

This work was supported by NSERC and the NSERC-Essilor Industrial Research Chair.



## References

1. Julesz B. Binocular Depth Perception of Computer-Generated Patterns. *Bell System Technical Journal*. 1960;39(5):1125-62.
2. Viswanathan L, Mingolla E. Dynamics of attention in depth: evidence from multielement tracking Perception. 2002;31(12):1415-37.
3. Faubert J, Sidebottom L. Perceptual-Cognitive Training of Athletes. *Journal of Clinical Sport Psychology*. 2012;6:85-102.
4. Faubert J, Allard R. Stereoscopy benefits processing of dynamic visual scenes by disambiguating object occlusions. *Journal-of-Vision*. 2013(13):p.1292.
5. Takai Y, Sato M, Tan R, Hirai T. Development of stereoscopic acuity: longitudinal study using a computer-based random-dot stereo test. *Japanese journal of ophthalmology*. 2005;49(1):1-5. Epub 2005/02/05.
6. Shea SL, Fox R, Aslin RN, Dumais ST. Assessment of stereopsis in human infants. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1980;19(11):1400-4. Epub 1980/11/01.
7. Giaschi D, Narasimhan S, Solski A, Harrison E, Wilcox L. On the typical development of stereopsis: fine and coarse processing. *Vision Res*. 2013;89:65-71.
8. Fox R, Patterson R, Francis EL. Stereoacuity in young children. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1986;27(4):598-600.
9. Leat S, St Pierre J, Hassan-Abadi S, Faubert J. The Moving Dynamic Random Dot Stereotest: Development, Age Norms, an Comparison With the Frisby, Randot, and Stereo Smile Tests. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*. 2001(38):284-94.
10. Wright LA, Wormald RP. Stereopsis and ageing. *Eye (The Royal College of Ophthalmologists)*. 1992;6(5):473-6.
11. Schneck ME, Haegerstrom Portnoy G, Lott LA, Brabyn JA. Ocular contributions to age-related loss in coarse stereopsis. *Optom Vis Sci*. 2000;77(10):531-6.
12. 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(2):891-900. Epub 2003/01/31.
13. Faubert J. Visual perception and aging. *Canadian journal of experimental psychology = Revue canadienne de psychologie experimentale*. 2002;56(3):164-76. Epub 2002/09/26.
14. Habak C, Faubert J. Larger effect of aging on the perception of higher-order stimuli. *Vision Res*. 2000;40(8):943-50. Epub 2000/03/18.
15. Legault I, Allard R, Faubert J. Healthy older observers show equivalent perceptual-cognitive training benefits to young adults for multiple object tracking. *Frontiers in Psychology*. 2013;4:323.
16. Trick LM, Jaspers-Fayer F, Sethi N. Multiple-object tracking in children: The "Catch the Spies" task. *Cognitive Development*. 2005;20(3):373-87.

17. Legault I, Faubert J. Perceptual-cognitive training improves biological motion perception: evidence for transferability of training in healthy aging. *Neuroreport*. 2012;23(8):469-73. Epub 2012/04/13.
18. Levitt H. Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1971;49(2):Suppl2.
19. Faubert J. Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Scientific reports*. 2013;3:1154. Epub 2013/02/05.
20. Koldewyn K, Weigelt S, Kanwisher N, Jiang Y. Multiple object tracking in autism spectrum disorders. *Journal of autism and developmental disorders*. 2013;43(6):1394-405. Epub 2012/10/30.
21. Sekuler R, McLaughlin C, Yotsumoto Y. Age-related changes in attentional tracking of multiple moving objects. *Perception*. 2008;37(6):867-76. Epub 2008/08/09.
22. Trick LM, Perl T, Sethi N. Age-related differences in multiple-object tracking. *The journals of gerontology Series B, Psychological sciences and social sciences*. 2005;60(2):P102-5. Epub 2005/03/05.
23. O'Connor AR, Birch EE, Anderson S, Draper H. The functional significance of stereopsis. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2010;51(4):2019-23. Epub 2009/11/26.
24. Alramis F, Roy E, Christian L, Niechwiej-Szwedo E. Contribution of binocular vision to the performance of complex manipulation tasks in 5-13 years old visually-normal children. *Human movement science*. 2016;46:52-62. Epub 2016/01/02.
25. Zinn WJ, Solomon H. A comparison of static and dynamic stereoacuity. *J Am Optom Assoc*. 1985;56(9):712-5. Epub 1985/09/01.
26. Luria SM, Weissman S. Relationship between static and dynamic stereo acuity. *Journal of Experimental Psychology*. 1968;76(1):51-6.
27. Tidbury LP, Brooks KR, O'Connor AR, Wuerger SM. A Systematic Comparison of Static and Dynamic Cues for Depth Perception. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2016;57(8):3545-53. Epub 2016/07/06.
28. Tinjust D, Allard R, Faubert J. Impact of stereoscopic vision and 3D representation of visual space on multiple object tracking performance. *Journal of Vision*; Charlottesville, Va.2008. p. 509.

## Chapitre 3 : Discussion

Alors que plusieurs études ont comparé les scores au MOT ou 3D-MOT des adultes à celles des enfants ou des âgés, cette étude est la première à évaluer l'impact de l'effet stéréoscopique sur les performances au MOT de l'enfant à l'ainé. Tout d'abord, cette étude a démontré que les performances à cette tâche n'ont pas atteint un niveau adulte à 7-12 ans, et sont diminuées à 65 ans. Également, les résultats, exposés plus en détail dans l'article, démontrent que les enfants et les adultes bénéficient de façon égale de l'effet stéréoscopique lors de l'exécution de cette tâche, alors que les personnes âgées n'en retirent pas d'avantage significatif. Les sujets de tous les groupes âge ont également réussi à compléter la tâche, malgré une certaine crainte face à la tablette venant de quelques participants âgés.

Plusieurs autres études ont utilisé une tâche de 3D-MOT avec un groupe de sujets enfants. Par contre, ces études ont majoritairement mesuré le nombre maximal de cibles pouvant être suivies correctement (74, 76-79), contrairement à la mesure du seuil minimal de vitesse permettant de suivre un nombre donné de cibles. La méthode utilisée dans la présente étude est plus précise puisqu'il s'agit d'une échelle continue, sans effet plafond. L'utilisation de seuil de vitesse permet également de comparer directement les résultats des différents groupes de notre étude. Ainsi, il est plus difficile d'opposer nos résultats aux scores mesurés chez les groupes de sujets enfants d'autres études. Néanmoins, tout comme Trick, Jaspers-Fayer & Sethi (74), des performances plus faibles ont été mesurées chez des enfants jusqu'à 12 ans, alors que les performances étaient maximales à partir de 19 ans. Par contre, aucun groupe entre 12 et 19 ans n'a été testé. Il serait intéressant d'évaluer quel est l'âge exact auquel les enfants obtiennent des performances similaires à celles d'adultes. La mesure du seuil de vitesse avec un groupe âgé a été utilisée avec des sujets âgés par d'autres groupes de recherche, dont Legault, Allard & Faubert (72) qui ont obtenus des performances plus faibles chez des sujets âgés entre 61 et 74 ans. De façon similaire au groupe enfant, il serait avantageux d'effectuer ces études avec des adultes entre 40 et 65 ans afin de déterminer l'âge auquel les performances commencent à diminuer.

Considérant les résultats de la présente recherche, des études subséquentes sont à considérer. Tout d'abord, dans le but de valider les performances au NeuroTracker™ sur tablette, il serait pertinent de comparer les résultats au NeuroTracker™ sur tablette aux performances obtenues avec le CAVE, souvent utilisé dans les recherches sur le MOT. Cela permettrait d'évaluer de quelle façon les performances diffèrent selon la taille de l'écran utilisé. Puisque le CAVE présente un environnement plus immersif, avec des balles plus grosses et des disparités encore plus grossières, il est probable que le seuil de vitesse mesuré soit encore plus bas que celui trouvé sur tablette. L'utilisation du CAVE en comparaison avec la tablette permettrait également de vérifier l'impact de la stéréoscopie telle que mesurée dans cette étude. Comme exposé dans l'article, les disparités plus grossières du CAVE ont permis une amélioration des performances de 50% (66), par rapport à l'amélioration de 21% mesurée chez notre groupe adulte. Cette comparaison doit tout de même rester prudente puisque 4 cibles devaient être suivies dans le CAVE. Cette tâche plus complexe (4 balles vs 3 balles) pourrait avoir mené à une plus grande amélioration des performances grâce à l'effet stéréoscopique. En effet, Alramis & al (46) ont démontré un impact plus marqué de la binocularité pour les tâches de motricité fine plus complexes par rapport aux tâches plus faciles, chez les enfants comme chez les adultes. Leur étude considérait la binocularité, soit les vergences et la vision stéréoscopique, alors que notre protocole ne cible que la stéréoscopie. Néanmoins, il pourrait être intéressant d'évaluer l'impact des indices stéréoscopiques sur une tâche au MOT présentant 3 cibles vs 4 cibles, chez différents groupes d'âge.

Que ce soit avec le CAVE ou la version sur tablette, il devient pertinent d'évaluer une population plus jeune que celle de cette étude (7-12 ans), c'est-à-dire des enfants d'âge préscolaire. La stéréoscopie se développe dans les premières années de la vie et les enfants de 5 ans n'ont probablement pas une vision stéréoscopique complète comme celle des adultes (2, 41-45). En utilisant un protocole semblable à celui de cette étude, c'est-à-dire en effectuant la tâche avec et sans indices stéréoscopiques, il serait possible d'évaluer si l'effet stéréoscopique a un impact aussi important chez des enfants de 5 ans que chez des enfants d'âge scolaire ou des adultes. Puisque les enfants de 5 ans n'atteignent généralement pas le seuil d'acuité stéréoscopique minimal de 20 secondes d'arc au *Randot Stereotest*® (43), il serait également

envisageable d'effectuer des analyses de corrélation entre leur acuité stéréoscopique au *Randot Stereotest*<sup>®</sup> et l'amélioration des performances grâce à la stéréoscopie.

Ces premières études évaluant les performances de sujets normaux pourraient ensuite mener à des études cliniques, impliquant des populations ayant une vision binoculaire anormale. La présente étude a démontré que les sujets de différents groupes d'âge étaient capables d'utiliser cet outil portable. Il est donc intéressant de s'attarder aux bénéfices que pourraient avoir le NeuroTracker<sup>™</sup> sur tablette dans un contexte clinique. Par exemple, chez les enfants amblyopes, un traitement de cache-œil est souvent initié afin d'améliorer l'acuité visuelle de l'œil amblyope. L'amélioration de l'acuité visuelle est le plus souvent associée à une amélioration du seuil d'acuité stéréoscopique mesuré, et donc une meilleure stéréoscopie (80). Le gain d'acuité stéréoscopique pourrait-il être corrélé à une augmentation de l'avantage stéréoscopique, telle que mesurée par notre protocole? L'utilisation du NeuroTracker<sup>™</sup>, en version stéréoscopique et non-stéréoscopique, permettrait d'évaluer l'impact du traitement de cache-œil d'une autre façon que simplement par l'acuité visuelle. En effet, il est intéressant de se demander de quelle façon la stéréoscopie gagnée par ses enfants les aide à naviguer dans le monde qui les entoure. Même s'ils atteignent parfois un niveau d'acuité stéréoscopique semblable aux enfants du même âge ayant une vision binoculaire normale, il est possible que l'intégration de cette information stéréoscopique nouvellement acquise ne soit pas aussi optimale.

La portabilité du NeuroTracker<sup>™</sup> sur tablette est également intéressante dans d'autres domaines que l'optométrie ou les sciences de la vision. En effet, les patients ayant subi une commotion cérébrale rapportent souvent des symptômes visuels, alors que l'outil de référence en commotion cérébrale, le SCAT3 (Sport Concussion Assessment Tool 3), n'en tient pas compte (69). Également, certaines fonctions cognitives qui peuvent être altérées lors d'une commotion cérébrale sont également nécessaires à la réussite d'une tâche de 3D-MOT (64). En effet, il est démontré que les scores au SCAT3 (Sport Concussion Assessment Tool 3) expliquent en partie les performances au 3D-MOT : un score plus faible à cette évaluation cognitive sera associé à une moins bonne performances au 3D-MOT (69). L'utilisation d'une tâche de 3D-MOT a donc été considérée pour évaluer d'une autre façon les athlètes qui se

rétablissent d'une commotion cérébrale. La possibilité d'utiliser cet outil en version portable faciliterait l'utilisation par les professionnels de la santé impliqués dans le traitement des commotions cérébrales. Alors que plusieurs équipes sportives utilisent déjà le NeuroTracker™ en format original pour l'entraînement des athlètes, la version portable pourrait être utile à l'équipe médicale qui les supporte ou servir à l'entraînement à la maison des athlètes.

Les limitations de cette étude résident entre-autre dans le choix du test de stéréoscopie. Une évaluation plus précise de la stéréoscopie, en obtenant réellement un seuil de stéréoscopie pour tous les sujets, aurait peut être modifié les rapports de corrélation avec les scores au 3D-MOT. Le *Randot Stereotest*® présente des disparités de 20 secondes d'arc ou plus grossier, ce qui limite le seuil d'acuité stéréoscopique mesurable. Ainsi, la majorité des participants adultes et enfants ayant atteint le niveau plafond de 20 secondes d'arc, les acuités stéréoscopiques de ces deux groupes ne pouvaient être considérées dans le rapport de corrélation. Seules les acuités stéréoscopiques du groupe âgé ont pu être considérées. Malheureusement, il est difficile de trouver un test de stéréoscopie où un seuil d'acuité stéréoscopique peut être mesuré chez tous les sujets. Le test de *Frisby*, par exemple, a été conçu pour mesurer des seuils de disparité jusqu'à 15 secondes d'arc. Par contre, pour les quelques sujets qui pourraient percevoir ces fines disparités, on ne pourrait établir avec certitude leur seuil d'acuité stéréoscopique à 15 secondes d'arc puisqu'aucune disparité plus fine n'aurait été testée. Finalement, les groupes d'âge de cette étude ont donné un portrait global de l'impact de la stéréoscopie sur le 3D-MOT selon l'âge, sans évaluer de façon continue des sujets de tous les âges. En ayant plus de participants, dans des groupes d'âge allant de 5 à 75 ans, il serait possible de suivre précisément la progression de l'avantage stéréoscopique sur le NeuroTracker™.

## **Chapitre 4 : Conclusion**

Le programme NeuroTracker™ sur tablette est facilement utilisable autant chez les enfants que chez les personnes âgées, même s'ils performant de façon inférieure aux adultes. L'ajout de l'effet stéréoscopique aide les enfants de 7 à 12 ans de la même manière que les adultes à accomplir cette tâche, alors que l'effet est négligeable pour les personnes âgées de 65 ans et plus. Ces résultats reflètent l'utilisation de la vision 3D pour ces différents groupes d'âge dans un environnement dynamique et complexe, ayant des caractéristiques semblables au monde dans lequel nous évoluons. Des études futures pourraient permettre d'établir les paramètres du NeuroTracker™ sur tablette pour en faire un outil clinique.

## Bibliographie

1. Von Noorden G, C. Campos E. Binocular vision and ocular motility : theory and management of strabismus. 6e éd. St. Louis, Missouri: Mosby; 2002.
2. Jeanrot N, Jeanrot F. Manuel de strabologie. 3e éd. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson; 2011.
3. Harrold AL, Grove PM. Binocular correspondence and the range of fusible horizontal disparities in the central visual field. *Journal of vision*. 2015;15(8):12.
4. Péchereau A, Denis DI, Speeg-Schatz C. Strabisme. Paris: Société Française d'ophtalmologie, 2013.
5. Julesz B. Cyclopean perception and neurophysiology. *Investigative ophthalmology*. 1972;11(6):540-8.
6. Gantz L, Bedell HE. Transfer of perceptual learning of depth discrimination between local and global stereograms. *Vision Res*. 2010;50(18):1891-9. Epub 2010/07/06.
7. Julesz B. Binocular Depth Perception of Computer-Generated Patterns. *Bell System Technical Journal*. 1960;39(5):1125-62.
8. Fawcett SL, Birch EE. Validity of the Titmus and Randot circles tasks in children with known binocular vision disorders. *Journal of AAPOS : the official publication of the American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus / American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*. 2003;7(5):333-8. Epub 2003/10/21.
9. Antona B, Barrio A, Sanchez I, Gonzalez E, Gonzalez G. Intraexaminer repeatability and agreement in stereoacuity measurements made in young adults. *International journal of ophthalmology*. 2015;8(2):374-81. Epub 2015/05/06.
10. Hahn E, Comstock D, Durling S, MacCarron J, Mulla S, James P, et al. Monocular Clues in Seven Stereotests. *Dalhousie Medical Journal*. 2010;37(1):4-13.
11. Garnham L, Sloper JJ. Effect of age on adult stereoacuity as measured by different types of stereotest. *Br J Ophthalmol*. 2006;90(1):91-5. Epub 2005/12/20.
12. Parks MM. The monofixation syndrome. *Transactions of the American Ophthalmological Society*. 1969;67:609-57.
13. Pageau M, de Guise D, Saint-Amour D. [Local and global stereopsis in children with microstrabismus]. *Canadian journal of ophthalmology Journal canadien d'ophtalmologie*. 2011;46(3):271-5. Epub 2011/07/26. Stereopsies locale et globale chez l'enfant microstrabique.



14. Haegerstrom-Portnoy G, Schneck ME, Brabyn JA. Seeing into old age: vision function beyond acuity. *Optom Vis Sci.* 1999;76(3):141-58. Epub 1999/04/23.
15. 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(2):891-900. Epub 2003/01/31.
16. Luria SM, Weissman S. Relationship between static and dynamic stereo acuity. *Journal of Experimental Psychology.* 1968;76(1):51-6.
17. Zinn WJ, Solomon H. A comparison of static and dynamic stereoacuity. *J Am Optom Assoc.* 1985;56(9):712-5. Epub 1985/09/01.
18. Sachsenweger M. Testing visual perception of three-dimensionally moving objects (dynamic stereoscopy). *Doc Ophthalmol.* 1986;64(4):379-85. Epub 1986/01/01.
19. Tidbury LP, Brooks KR, O'Connor AR, Wuerger SM. A Systematic Comparison of Static and Dynamic Cues for Depth Perception. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2016;57(8):3545-53. Epub 2016/07/06.
20. Poggio GF, Poggio T. The analysis of stereopsis. *Annual review of neuroscience.* 1984;7:379-412. Epub 1984/01/01.
21. Qiu FT, von der Heydt R. Figure and ground in the visual cortex: v2 combines stereoscopic cues with gestalt rules. *Neuron.* 2005;47(1):155-66. Epub 2005/07/06.
22. Parker AJ. Binocular depth perception and the cerebral cortex. *Nature reviews Neuroscience.* 2007;8(5):379-91. Epub 2007/04/25.
23. Faubert J. Motion parallax, stereoscopy, and the perception of depth: Practical and theoretical issues. In *Three-dimensional video and display: devices and systems*, Bahram Javidi, Fumio Okano, Editors, *Proceedings of SPIE 2001*;Vol. CR76:168-91.
24. O'Connor AR, Birch EE, Anderson S, Draper H. The functional significance of stereopsis. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2010;51(4):2019-23. Epub 2009/11/26.
25. Patla AE, Niechwiej E, Racco V, Goodale MA. Understanding the contribution of binocular vision to the control of adaptive locomotion. *Experimental brain research.* 2002;142(4):551-61. Epub 2002/02/15.
26. Greenwald HS, Knill DC, Saunders JA. Integrating visual cues for motor control: a matter of time. *Vision Res.* 2005;45(15):1975-89. Epub 2005/04/12.
27. Thorn F, Gwiazda J, Cruz AA, Bauer JA, Held R. The development of eye alignment, convergence, and sensory binocularity in young infants. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1994;35(2):544-53. Epub 1994/02/01.

28. Weinacht S, Kind C, Monting JS, Gottlob I. Visual development in preterm and full-term infants: a prospective masked study. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1999;40(2):346-53. Epub 1999/02/09.
29. Von Hofsten C, Rosander K. The development of gaze control and predictive tracking in young infants. *Vision Res.* 1996;36:81-96.
30. Leat SJ, Yadav NK, Irving EL. Development of Visual Acuity and Contrast Sensitivity in Children. *Journal of Optometry.* 2009;2(1):19-26.
31. Beazley LD, Illingworth DJ, Jahn A, Greer DV. Contrast sensitivity in children and adults. *Br J Ophthalmol.* 1980;64(11):863-6.
32. Bharadwaj SR, Candy TR. Accommodative and vergence responses to conflicting blur and disparity stimuli during development. *J Vis.* 2014;9(11):4.1-18.
33. Bharadwaj SR, Candy TR. Cues for the control of ocular accommodation and vergence during postnatal human development. *J Vis.* 2008;8(16):14.1-6. Epub 2009/01/17.
34. Habak C, Faubert J. Larger effect of aging on the perception of higher-order stimuli. *Vision Res.* 2000;40(8):943-50. Epub 2000/03/18.
35. Ellemberg D, Lewis TL, Meghji KS, Maurer D, Guillemot JP, Lepore F. Comparison of sensitivity to first- and second-order local motion in 5-year-olds and adults. *Spatial vision.* 2003;16(5):419-28. Epub 2004/03/05.
36. Faubert J. Visual perception and aging. *Canadian journal of experimental psychology = Revue canadienne de psychologie experimentale.* 2002;56(3):164-76. Epub 2002/09/26.
37. Hayward J, Truong G, Partanen M, Giaschi D. Effects of speed, age, and amblyopia on the perception of motion-defined form. *Vision Res.* 2011;51(20):2216-23. Epub 2011/09/14.
38. Ahmed IJ, Lewis TL, Ellemberg D, Maurer D. Discrimination of speed in 5-year-olds and adults: are children up to speed? *Vision Res.* 2005;45(16):2129-35. Epub 2005/04/23.
39. Takai Y, Sato M, Tan R, Hirai T. Development of stereoscopic acuity: longitudinal study using a computer-based random-dot stereo test. *Japanese journal of ophthalmology.* 2005;49(1):1-5. Epub 2005/02/05.
40. Shea SL, Fox R, Aslin RN, Dumais ST. Assessment of stereopsis in human infants. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1980;19(11):1400-4. Epub 1980/11/01.
41. Giaschi D, Narasimhan S, Solski A, Harrison E, Wilcox L. On the typical development of stereopsis: fine and coarse processing. *Vision Res.* 2013;89:65-71.
42. Fox R, Patterson R, Francis EL. Stereoacuity in young children. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1986;27(4):598-600.

43. Leat S, St Pierre J, Hassan-Abadi S, Faubert J. The Moving Dynamic Random Dot Stereotest: Development, Age Norms, and Comparison With the Frisby, Randot, and Stereo Smile Tests. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*. 2001(38):284-94.
44. Fawcett SL, Wang YZ, Birch EE. The critical period for susceptibility of human stereopsis. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2005;46(2):521-5. Epub 2005/01/27.
45. Afsari S, Rose KA, Pai AS, Gole GA, Leone JF, Burlutsky G, et al. Diagnostic reliability and normative values of stereoacuity tests in preschool-aged children. *Br J Ophthalmol*. 2013;97(3):308-13. Epub 2013/01/08.
46. Alramis F, Roy E, Christian L, Niechwiej-Szwedo E. Contribution of binocular vision to the performance of complex manipulation tasks in 5-13 years old visually-normal children. *Human movement science*. 2016;46:52-62. Epub 2016/01/02.
47. Ciner E, Ying G-S, Kulp M, Maguire M, Quinn G, Orel Bixler D, et al. Stereoacuity of preschool children with and without vision disorders. *Optom Vis Sci*. 2014;91(3):351-8.
48. Moussa M, Leat S, Faubert J. The Moving Dynamic Random Dot Stereotest: Validity and Repeatability. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*. 2003(40):341-8.
49. Wallace DK, Lazar EL, Melia M, Birch EE, Holmes JM, Hopkins KB, et al. Stereoacuity in children with anisometropic amblyopia. *Journal of AAPOS : the official publication of the American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus / American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*. 2011;15(5):455-61.
50. Bridge H. Effects of cortical damage on binocular depth perception. *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B, Biological sciences*. 2016;371(1697). Epub 2016/06/09.
51. Hess RF, Thompson B. Amblyopia and the binocular approach to its therapy. *Vision Res*. 2015;114:4-16. Epub 2015/04/25.
52. Blake R, Wilson H. Binocular Vision. *Vision Res*. 2011;51(7):754-70.
53. Spear PD. Neural bases of visual deficits during aging. *Vision Res*. 1993;33(18):2589-609. Epub 1993/12/01.
54. Curcio CA. Photoreceptor topography in ageing and age-related maculopathy. *Eye (London, England)*. 2001;15(Pt 3):376-83. Epub 2001/07/14.
55. Elliott DB, Yang KC, Whitaker D. Visual acuity changes throughout adulthood in normal, healthy eyes: seeing beyond 6/6. *Optom Vis Sci*. 1995;72(3):186-91. Epub 1995/03/01.
56. Owsley C. Aging and vision. *Vision Res*. 2011;51(13):1610-22. Epub 2010/10/27.

57. Wuerger S. Colour constancy across the life span: evidence for compensatory mechanisms. *PLoS One*. 2013;8(5):e63921. Epub 2013/05/15.
58. Genova B, Bocheva N. Age-related changes in sensitivity to global speed. *Canadian Journal of Experimental Psychology*. 2013;67(3):195-204.
59. Laframboise S, De Guise D, Faubert J. Effect of aging on stereoscopic interocular correlation. *Optom Vis Sci*. 2006;83(8):589-93.
60. Wright LA, Wormald RP. Stereopsis and ageing. *Eye (The Royal College of Ophthalmologists)*. 1992;6(5):473-6.
61. Schneck ME, Haegerstrom Portnoy G, Lott LA, Brabyn JA. Ocular contributions to age-related loss in coarse stereopsis. *Optom Vis Sci*. 2000;77(10):531-6.
62. Brown B, Yap MK, Fan WC. Decrease in stereoacuity in the seventh decade of life. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*. 1993;13(2):138-42. Epub 1993/04/01.
63. Pylyshyn ZW, Storm RW. Tracking multiple independent targets: evidence for a parallel tracking mechanism. *Spatial vision*. 1988;3(3):179-97. Epub 1988/01/01.
64. Faubert J, Sidebottom L. Perceptual-Cognitive Training of Athletes. *Journal of Clinical Sport Psychology*. 2012;6:85-102.
65. Fougny D, Marois R. Distinct capacity limits for attention and working memory: Evidence from attentive tracking and visual working memory paradigms. *Psychological science*. 2006;17(6):526-34. Epub 2006/06/15.
66. Tinjust D, Allard R, Faubert J. Impact of stereoscopic vision and 3D representation of visual space on multiple object tracking performance. *Journal of Vision*; Charlottesville, Va.2008. p. 509.
67. Faubert J. Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Scientific reports*. 2013;3:1154. Epub 2013/02/05.
68. Parsons B, Magill T, Boucher A, Zhang M, Zogbo K, Bérubé S, et al. Enhancing Cognitive Function Using Perceptual-Cognitive Training. *Clin EEG Neurosci [En ligne]*. December 30, 2014 2014 [cité le June 12 2015];[1-11 pp.]. Disponible: <http://eeg.sagepub.com/content/early/2014/12/29/1550059414563746.long> - ref-list-1
69. Oslund KR. The extent to which the King-Devick Test and Sport Concussion Assessment Tool 3 Predict 3-Dimensional Multiple Object Tracking Speed 2017.
70. Sekuler R, McLaughlin C, Yotsumoto Y. Age-related changes in attentional tracking of multiple moving objects. *Perception*. 2008;37(6):867-76. Epub 2008/08/09.

71. Trick LM, Perl T, Sethi N. Age-related differences in multiple-object tracking. *The journals of gerontology Series B, Psychological sciences and social sciences*. 2005;60(2):P102-5. Epub 2005/03/05.
72. Legault I, Allard R, Faubert J. Healthy older observers show equivalent perceptual-cognitive training benefits to young adults for multiple object tracking. *Frontiers in Psychology*. 2013;4:323.
73. Legault I, Faubert J. Perceptual-cognitive training improves biological motion perception: evidence for transferability of training in healthy aging. *NeuroReport*. 2012;23:469-73.
74. Trick LM, Jaspers-Fayer F, Sethi N. Multiple-object tracking in children: The "Catch the Spies" task. *Cognitive Development*. 2005;20(3):373-87.
75. Koldewyn K, Weigelt S, Kanwisher N, Jiang Y. Multiple object tracking in autism spectrum disorders. *Journal of autism and developmental disorders*. 2013;43(6):1394-405. Epub 2012/10/30.
76. Dedrick D, Trick L. *Computation, Cognition, and Pylyshyn*: MIT Press; 2009.
77. Evers K, de-Wit L, Van der Hallen R, Haesen B, Steyaert J, Noens I, et al. Brief report: Reduced grouping interference in children with ASD: evidence from a Multiple Object Tracking Task. *Journal of autism and developmental disorders*. 2014;44(7):1779-87. Epub 2014/01/09.
78. O'Hearn K, Landau B, Hoffman JE. Multiple Object Tracking in People With Williams Syndrome and in Normally Developing Children. *Psychological science*. 2005;16(11):905-12.
79. Trick LM, Audet D, Dales L. Age differences in enumerating things that move: implications for the development of multiple-object tracking. *Memory & cognition*. 2003;31(8):1229-37. Epub 2004/04/03.
80. Lee SY, Isenberg SJ. The relationship between stereopsis and visual acuity after occlusion therapy for amblyopia. *Ophthalmology*. 2003;110(11):2088-92. Epub 2003/11/05.