

Ecole Doctorale des Sciences de l'Homme et de la Société

Unité de recherche PSITEC ULR 4072

Université de Lille

La navigation spatiale des personnes présentant une déficience intellectuelle : une approche oculométrique

Thèse de doctorat en vue de l'obtention du titre de Docteur en Psychologie
présentée et soutenue publiquement le 30 janvier 2025 par

Alexandra STRUYF

Sous la direction du Pr. Yannick COURBOIS et du Dr. Laurent SPARROW

Composition du jury

Pr. Valerie GYSELINCK	Université Gustave Eiffel Université Paris Cité	Présidente et rapportrice
Pr. Geneviève PETITPIERRE	Université de Fribourg	Examinatrice
Pr. Valérie PENNEQUIN	Université de Tours	Rapportrice
Dr. Hursula MENGUE-TOPIO	Université de Lille	Examinatrice
Pr. Roland MAURER	Université de Genève	Invité
Pr. Yannick COURBOIS	Université de Lille	Directeur de thèse
Dr. Laurent SPARROW	Université de Lille	Co-encadrant de thèse

Cette thèse a bénéficié d'une allocation doctorale financée par l'Université de Lille et d'un soutien financier de la région Hauts de France.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements s'adressent à mes directeurs de thèse, Yannick Courbois et Laurent Sparrow. Je les remercie sincèrement de m'avoir donné la chance de réaliser cette thèse et de m'avoir accompagnée et soutenue pendant ces années de travail. Un grand merci pour votre accompagnement régulier, pour vos conseils et l'aide que vous m'avez apportée tout au long de cette thèse. Merci Yannick pour ces échanges réguliers, vos commentaires bienveillants et vos relectures attentives qui m'ont permis de mener à bien ce travail de thèse.

Je remercie grandement les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux de thèse. Je remercie la Pr. Valérie Gyselinck et la Pr. Valérie Pennequin d'avoir évalué ce travail au préalable en tant que rapportrices. Je remercie également la Pr. Valérie Gyselinck d'avoir accepté de présider ce jury. Je remercie la Pr. Geneviève Petitpierre, la Dr. Hursula Mengue-Topio et le Dr. Roland Maurer pour leur présence dans ce jury.

Je remercie l'Université de Lille ainsi que la région Hauts-de-France de m'avoir apporté un soutien financier et permis de réaliser ces travaux de thèse.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble des participants. À l'origine de la motivation même de ce travail, je tiens à les remercier d'avoir participé à ces trois recherches. Je les remercie pour les conseils, commentaires et temps qu'ils ont accordés à ce projet de recherche. Je les remercie pour leur participation souriante, bienveillante et pour leur engagement dans ce souhait d'améliorer le quotidien de tout un chacun. Merci à vous tous et toutes, sans vous, cette recherche n'aurait jamais pu avoir lieu. J'adresse également mes profonds remerciements aux professionnels des structures qui nous ont accueillies et qui ont contribué à la mise en place de ces trois études. Je remercie l'association AFEJI, les Papillons Blancs de Lille et de Roubaix-Tourcoing. Un grand merci à Cindy Baudry, Magali De Clerck, Fabrice Taupin, Nathalie Chauwin, Patrick Geuns, Matthieu Brandt, Delphine Dieulle, Michel Evrard, Marie Cattelotte, Mathias Lourenço et Cathy Coppin Gilman.

Je remercie le laboratoire PSITEC de m'avoir accompagnée et accueillie pendant ces années de thèse. Je remercie particulièrement Marion Luyat pour son accompagnement pendant ces années de thèse. Je remercie également Sylvie Hivet et Christine Humez qui a été présente tout au long de ces années avec ses conseils, sa bienveillance et sa prévenance qui m'ont été d'une très grande aide. Je remercie vivement les membres de l'axe handicap et développement pour ces moments chaleureux partagés en équipe : Bruno Villette, Agnès Desbiens, Marie Danet, Claire Hofer et Lisa Jacquy. Je remercie également le laboratoire SCALAB et l'équipe

de l'Imaginarium qui m'ont conseillée dans la réalisation de recherches en *eye-tracking*. Je remercie Paul Kozieja pour le travail de programmation des environnements virtuels qui a permis à ces recherches de voir le jour. Je remercie Sabrina Abed, Maxime Ducloy et Pascaline Lamblé pour leur aide et accompagnement dans la réalisation de ce doctorat et l'organisation de cette soutenance de thèse.

Je remercie également l'équipe HADEPAS qui m'a accueillie lors de cette quatrième année et m'a permis de découvrir le monde de la recherche participative.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres de mon Comité de Suivi de Thèse Amélie Rousseau et Guillaume Gimenes qui m'ont suivie et encouragée avec une grande bienveillance et écoute chaque année.

Je remercie spécifiquement Julie Lecerf qui m'a accompagnée au cours d'une année en tant qu'ingénieure de recherche. Merci à toi pour ton aide et cette année de travail en collaboration. Je tiens également à remercier Manon Purel et Cassandra Vêtu pour leur travail de récolte de données qui a grandement aidé ce travail.

À présent, je souhaiterais remercier les doctorants qui ont été une grande famille pendant ces années. Je remercie Clémence, Elliot, Camille et Valentyn pour l'entièreté de ces moments que nous avons pu passer. Vous avez été le rayon de soleil de ces années de thèse par votre humour et votre bonne humeur, qui m'ont permis de surmonter chaque obstacle. Je remercie Andrès, Marion D., Antoine, Florent, Gauthier, Lisa, Alexandra, Clotilde, Samantha, Claire, Oriane, Luc, Willy's, Marion N., Nicolas, et tous les autres doctorants que j'ai eu la chance de rencontrer et avec qui j'ai passé de très belles années.

Enfin je remercie ma famille et mes amis pour leur aide et leur accompagnement pendant ces années. Je tiens à remercier spécifiquement Céline et Agnès pour leur écoute et leur aide tout au long de ce doctorat. Je remercie Antoine de m'avoir soutenu lors de cette dernière année remplie d'imprévus. Enfin, mes remerciements vont à Charles, mon frère qui m'a encouragé à réaliser cette aventure, qui a toujours cru en moi et qui m'a aidé tout au long de mes études. Un grand merci, tout cela n'aurait jamais été possible sans toi.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	14
ABSTRACT	16
INTRODUCTION.....	18
CHAPITRE 1 : LA COGNITION SPATIALE.....	20
1. La navigation spatiale	22
1.2. Les cadres de référence	23
1.3. L'étude du wayfinding et la taxonomie de Wiener.....	24
2. Les connaissances spatiales	27
2.1. La connaissance des points de repère	27
2.1.1. Les différents points de repère et leur influence	27
2.1.2. La saillance des points de repère.....	30
2.1.3. L'étude de la connaissance et sélection des points de repère.....	32
2.2. La connaissance de routes.....	32
2.2.1. La connaissance de routes : concept et définition	32
2.2.2. L'étude de la connaissance de routes	34
2.3. La connaissance de configuration	34
2.3.1. La connaissance de configuration : concept et définition	34
2.3.2. L'étude de la connaissance de configuration	35
2.4. L'acquisition des connaissances spatiales.....	36
2.5. Quels sont les facteurs qui influencent les capacités de wayfinding ?.....	38
3. Les systèmes d'aide à la navigation	40
3.1. Les systèmes d'aide à la navigation : quels avantages et inconvénients ?.....	41
3.2. Quels points de repère fournir aux utilisateurs ?.....	42
4. Les environnements virtuels et l'oculométrie	44
4.1 Les environnements virtuels	44
4.2. Les mouvements oculaires	45

4.2.1. L'oculométrie	45
4.2.2. Les paramètres oculaires	46
5. L'apport de l'oculométrie dans l'étude de la navigation spatiale.....	49
5.1. Études au sein de la population générale	49
5.2. Études auprès de populations cliniques	56
6. La charge cognitive, un concept applicable aux déplacements ?	57
6.1. La théorie de la charge cognitive	57
6.2. Les outils de mesure de la charge cognitive	59
6.2.1. Mesures subjectives.....	59
6.2.2. Mesures objectives	59
6.2.3. Mesures mixtes.....	60
6.3. La dilatation pupillaire associée à la réalisation d'une tâche cognitive.....	61
6.4. La charge cognitive appliquée aux déplacements.....	62
CHAPITRE 2 : L'UTILISATION DE L'OCULOMÉTRIE POUR L'ÉTUDE DES CAPACITÉS DE DÉPLACEMENT DES PERSONNES PRÉSENTANT UNE DÉFICIENCE INTELLECTUELLE.....	66
1. Déficience intellectuelle : définition et étiologie.....	68
2. Les processus d'attention visuelle des personnes présentant une DI	69
3. L'oculométrie auprès des personnes présentant une DI	71
3.1. L'utilisation du matériel d'oculométrie auprès des personnes avec une DI	71
3.2. Les mouvements oculaires des personnes présentant une DI	72
3.2.1. Les fixations	72
3.2.2. Les saccades	73
3.2.3. Le diamètre de la pupille	73
4. Les capacités de déplacement des personnes présentant une DI	74
4.1. Les difficultés de déplacement.....	74
4.2. La sélection des points de repère	75
4.3. L'apprentissage de routes.....	77

4.4. La connaissance de la configuration	79
5. Les systèmes d'aide à la navigation destinés aux personnes présentant une DI	80
CHAPITRE 3 : PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE	83
CHAPITRE 4 : LA SÉLECTION DES POINTS DE REPÈRE BALISES ET ASSOCIATIFS DES PERSONNES PRÉSENTANT UNE DÉFICIENCE INTELLECTUELLE : UNE ÉTUDE EXPLORATOIRE D'UNE APPROCHE OCULOMÉTRIQUE (ÉTUDE 1)	87
1. Objectif de l'étude et hypothèses de recherche	89
2. Méthodologie	91
2.1. Participants	91
2.2. Matériel	92
2.3. Procédure	95
2.4. Analyses statistiques	96
3. Résultats	97
3.1. Tâche d'apprentissage d'itinéraires	97
3.2. Données oculométriques	98
3.3. Analyses de corrélation	104
4. Discussion	105
4.1. Participants au développement typique	105
4.2. Participants présentant une déficience intellectuelle	107
4.3. Comparaison entre les personnes au développement typique et celles présentant une déficience intellectuelle	108
4.4. Limites de la recherche	110
5. Conclusion	111
CHAPITRE 5 : L'OBSERVATION DES POINTS DE REPÈRE BALISES ET ASSOCIATIFS : QUELS EFFETS SUR L'APPRENTISSAGE D'ITINÉRAIRES CHEZ LES PERSONNES AVEC UNE DÉFICIENCE INTELLECTUELLE ? (ÉTUDE 2)	115
1. Objectif de l'étude et hypothèses de recherche	117
2. Méthodologie	118

2.1. Participants.....	118
2.2. Matériel	119
2.3. Procédure	124
3. Résultats.....	125
3.1. Tâche d'apprentissage d'itinéraires	125
3.2. Tâche de reconnaissance des points de repère	127
3.3. Données oculométriques	128
3.4. Analyses de corrélation	135
4. Discussion.....	136
4.1. Participants au développement typique.....	137
4.2. Participants présentant une déficience intellectuelle	138
4.3. Comparaison entre les deux groupes de participants.....	140
5. Conclusion	142
CHAPITRE 6 : L'INFLUENCE DE LA SAILLANCE PERCEPTIVE SUR L'OBSERVATION DES POINTS DE REPÈRE AUPRÈS DES PERSONNES PRÉSENTANT UNE DÉFICIENCE INTELLECTUELLE (ÉTUDE 3)	145
1. Objectif de l'étude et hypothèses de recherche	147
2. Méthodologie.....	150
2.1. Participants.....	150
2.2. Matériel	151
2.3. Procédure	156
2.4. Analyses statistiques	156
3. Résultats.....	157
3.1. Nombre d'essais et d'erreurs.....	157
3.2. Temps de réponse.....	157
3.3. Temps de fixation.....	158
3.4. Dilatation pupillaire	165
3.5. Analyses de corrélation	167

4. Discussion.....	168
4.1. Les participants au développement typique	168
4.2. Comparaison des résultats avec l'étude Grzeschik et al. (2019).....	170
4.3. Les participants avec une déficience intellectuelle	172
4.4. Comparaisons entre les groupes.....	174
5. Conclusion	176
CHAPITRE 7 : DISCUSSION GÉNÉRALE.....	179
1. Les environnements et stimuli : quelles ont été nos différentes manipulations expérimentales ?	182
1.1. Les points de repère	182
1.2. Le design visuel et expérimental des environnements virtuels.....	183
1.3. L'environnement de passation	185
2. Observer l'environnement, acquérir des connaissances spatiales	185
2.1. La découverte de l'itinéraire : comment se déroule la prise d'informations en phase de visionnage ?	185
2.1.1. L'observation des repères et de l'environnement.....	185
2.1.2. L'influence de la saillance perceptive	186
2.1.3. L'influence des différents points de repère	186
2.1.4. Conclusion.....	188
2.2. La phase de réponse et d'apprentissage	188
2.2.1. L'apprentissage au fil des essais	188
2.2.2. Les différences d'observation des repères et de l'environnement	189
2.2.3. L'effet de la saillance visuelle.....	189
2.2.4. L'effet des différents types de repères	190
2.2.5. Conclusion.....	193
3. Comment se manifeste l'apprentissage ?.....	193
3.1. Regarder les stimuli pertinents ou diminuer le temps alloué aux stimuli non pertinents ?	193

3.2. La dilatation pupillaire associée à l'apprentissage d'itinéraires	194
4. L'utilisation de l'eye-tracking pour l'étude la navigation spatiale auprès des personnes avec une DI	197
5. Quelles applications possibles ? Des systèmes d'aide à la mobilité à l'apprentissage de la mobilité.....	198
5.1. Les systèmes d'aide à la mobilité : les GPS adaptés et les guides voyageurs	199
5.2. Les adaptations environnementales : l'environnement urbain	200
5.3. Les prises en charge médico-éducatives : les remédiations et interventions éducatives	201
6. Limites des recherches.....	204
7. Perspectives de recherche	206
8. Conclusion générale.....	208
BIBLIOGRAPHIE	209
TABLE DES FIGURES	250
TABLE DES TABLEAUX.....	254
ANNEXES	255
Annexe 1a. Présentation de la recherche (étude 1).....	257
Annexe 1b. Présentation de la recherche en langage simplifié (étude 1)	258
Annexe 2a. Formulaire de consentement à la recherche (étude 1).....	260
Annexe 2b. Formulaire de consentement à la recherche en langage simplifié (étude 1) ...	261
Annexe 3. Consignes et déroulement de la passation (étude 1)	263
Annexe 4. Poster de restitution des résultats de la recherche en langage simplifié	264
Annexe 5. Article publié relatif à l'étude 1	265
Annexe 6a. Présentation de la recherche (étude 2).....	266
Annexe 6b. Présentation de la recherche en langage simplifié (étude 2)	270
Annexe 7a. Formulaire de consentement à la recherche (étude 2).....	273
Annexe 7b. Formulaire de consentement à la recherche en langage simplifié (étude 2) ...	275
Annexe 8. Consignes et déroulement de la passation (étude 2)	278

Annexe 9. Consignes de passation simplifiées (étude 2).....	279
Annexe 10. Questionnaire de mesure de la fréquence des déplacements et d’usage des jeux vidéo (étude 2 et 3)	281
Annexe 11. Communication orale relative à l’étude 1 et 2 en langage simplifié.....	282
Annexe 12a. Présentation de la recherche (étude 3).....	296
Annexe 12b. Présentation de la recherche en langage simplifié (étude 3)	300
Annexe 13a. Formulaire de consentement à la recherche (étude 3).....	303
Annexe 13b. Formulaire de consentement à la recherche en langage simplifié (étude 3) .	305
Annexe 14. Consignes de passation (étude 3)	308
Annexe 15. Consignes de passation simplifiées (étude 3).....	309

RÉSUMÉ

La mobilité personnelle est un droit fondamental pour les personnes handicapées (Convention relative aux droits des personnes handicapées, article 20, 2006). Elle est cependant limitée dans le cas des personnes avec un handicap mental, notamment une déficience intellectuelle (DI). Il apparaît que les adultes présentant une DI effectuent peu de déplacements en dehors de leur quartier d'habitation, ce qui peut engendrer un isolement social, un accès restreint aux loisirs ainsi qu'au monde professionnel. Or, plusieurs études ont démontré que ces personnes sont capables d'apprendre à se déplacer. Elles sont en mesure de mémoriser des itinéraires fixes, néanmoins l'un des principaux obstacles à l'apprentissage semble être la sélection d'informations pertinentes pour le déplacement (telles que les points de repère). Cette thèse utilise l'oculométrie pour identifier la nature des points de repère spontanément sélectionnés pendant l'apprentissage d'un itinéraire ainsi que la charge cognitive associée à cet apprentissage. La sélection des points de repère est analysée via les mouvements oculaires alors que la charge cognitive est estimée par le diamètre de la pupille. Les hypothèses avancées sont que : la saillance perceptive des points de repère et leur nombre expliquent une partie des difficultés rencontrées lors de la sélection de ceux-ci. De même que, certains lieux de l'environnement du fait de leurs caractéristiques impactent la charge cognitive, qui à son tour impactera les capacités de déplacement. Les résultats de cette thèse permettent de montrer que les personnes présentant une DI observent durant moins longtemps les points de repère en comparaison avec les personnes au développement typique et n'observent pas durant plus de temps les repères qui facilitent la mémorisation des itinéraires. Néanmoins, la répétition des essais permet d'améliorer les stratégies d'observation, ce qui est le signe d'un apprentissage. La saillance perceptive des points de repère améliore les performances d'apprentissage des personnes au développement typique, mais améliore uniquement la vitesse de réponse chez les personnes avec une DI. L'ensemble de ces résultats souligne l'importance d'axer les systèmes d'aide sur certains repères et certaines caractéristiques de ceux-ci telles que la saillance perceptive. Ils montrent également l'importance de créer des programmes de remédiation ciblés sur la sélection des repères.

Mots clés : Déficience intellectuelle, Navigation spatiale, Oculométrie, Points de repère, Environnement virtuel

ABSTRACT

Personal mobility is a fundamental right for people with disabilities (Convention on the Rights of Persons with Disabilities, Article 20, 2006). It is, however, limited in the case of people with mental disabilities, particularly intellectual disabilities (ID). Adults with ID appear to travel little outside their home area, which can lead to social isolation and restricted access to leisure activities and the world of work. Yet several studies have shown that these people are capable of learning how to get around. They can memorize fixed routes, but one of the main obstacles to learning seems to be the selection of information relevant to travel (such as landmarks). This thesis uses eye-tracking to identify the nature of landmarks spontaneously selected during route learning, as well as the cognitive load associated with this learning. Landmark selection is analysed via eye movements, while cognitive load is estimated by pupil diameter. The hypotheses put forward are that: the perceptual salience of landmarks and their number explains some of the difficulties encountered in selecting them. Similarly, the characteristics of certain places in the environment have an impact on cognitive load, which in turn has an impact on travel ability. The results of this thesis show that people with ID observe landmarks for shorter periods of time than typically developing individuals, and do not observe the landmarks that facilitate route memorization for longer. Nevertheless, repeated trials help to improve observation strategies, which is a sign of learning. Perceptual salience of landmarks improves learning performance in typically developing individuals, but only improves response speed in people with ID. Taken together, these results underline the importance of focusing support systems on certain landmarks and landmark characteristics, such as perceptual salience. They also show the importance of creating remediation programs targeted at landmark selection.

Keywords: Intellectual disability, Spatial navigation, Eye tracking, Landmarks, Virtual environment

INTRODUCTION

La navigation spatiale a une fonction adaptative centrale dans la vie des personnes, quel que soit leur âge. Que ce soit dans un cadre professionnel, social ou pour les loisirs, la capacité à se déplacer est une condition *sine qua non* de la participation sociale (Mengue-Topio et al., 2020; Migliore et al., 2008). Une restriction dans la réalisation des déplacements peut avoir des conséquences psychologiques importantes, notamment sur l'autodétermination, l'affirmation de soi ou la qualité de vie (Slevin et al., 1998). C'est pour ces raisons que la mobilité est un des principes fondamentaux de la Convention des Nations Unies en faveur du droit des personnes handicapées, qui a été ratifiée en 2010 par la France.

Les personnes présentant une déficience intellectuelle (DI) réalisent peu de trajets au quotidien (Mengue-Topio & Courbois, 2011). Les causes de cette restriction sont nombreuses (émotionnelles, cognitives, sociales, voir Mengue-Topio et al., 2023), mais parmi celles-ci, les limites de la cognition spatiale impactent fortement la capacité à se déplacer seul. Les personnes avec une DI ont des difficultés à se représenter correctement l'environnement dans lequel elles évoluent et peinent à apprendre de nouveaux itinéraires (Letalle et al., 2021). Ces difficultés pourraient elles-mêmes être partiellement liées à un défaut de sélection des points de repère comme le suggèrent les recherches réalisées en condition réelle et/ou en environnement virtuel (Courbois et al., 2012; Farran et al., 2016). Il reste cependant beaucoup à faire pour comprendre ce qui se passe à ce niveau élémentaire du traitement de l'information spatiale chez ces personnes.

Par ailleurs, l'application de l'oculométrie à l'étude de la navigation spatiale s'est avérée heuristique, que ce soit auprès de personnes au développement typique ou de populations cliniques (Bougenies et al., 2016; De Condappa & Wiener, 2016; Hilton et al., 2020; Kiefer et al., 2017). L'analyse des mouvements oculaires a permis d'examiner plus finement les processus cognitifs en jeu, mais également d'étudier l'influence de l'environnement visuel sur les capacités de déplacements.

À notre connaissance, seules deux études ont eu recours à l'oculométrie pour étudier les capacités de déplacement des personnes présentant une DI (Earl et al., 2019; Farran et al., 2016). L'usage de l'oculométrie étant encore peu répandu auprès de cette population, l'objectif de cette thèse est donc de mettre à l'épreuve son utilisation dans le contexte d'étude de la navigation

spatiale. Plus précisément, il s'agit de mieux comprendre les difficultés de sélection des points de repère chez les personnes avec une DI, mais également d'étudier l'impact de cette sélection sur les erreurs commises. Une étude exploratoire du coût cognitif associé à l'apprentissage d'itinéraires sera aussi entreprise en utilisant les variations de diamètre pupillaire comme indice. En tout, ce sont trois expériences qui ont été réalisées en couplant les technologies de l'oculométrie et des environnements virtuels. Ces études expérimentales portent sur l'influence des différents types de points de repère ainsi que de leurs caractéristiques visuelles sur la sélection et l'apprentissage.

Comprendre les difficultés de sélection des points de repère ainsi que leurs répercussions sur l'apprentissage d'itinéraires est essentiel pour envisager des remédiations possibles ainsi que des systèmes d'aide à la navigation qui seraient au plus près des besoins des personnes. Il est nécessaire d'identifier quels types d'informations sont les plus pertinentes à utiliser pour ensuite les intégrer aux technologies d'aide.

Nous aborderons en partie introductive la cognition spatiale et les différents types de connaissances, les systèmes d'aides et outils de mesures qui lui sont associés, en consacrant une partie importante aux environnements virtuels et à l'oculométrie pour ensuite ouvrir un questionnement sur la théorie de la charge cognitive associée aux déplacements. Les capacités de déplacements spécifiques aux personnes présentant une déficience intellectuelle feront ensuite l'objet d'un second chapitre introductif, où nous aborderons l'utilisation de l'oculométrie auprès de personnes avec un développement atypique ainsi que les systèmes d'aide à la navigation adaptée préexistants. Après avoir énoncé la problématique de recherche dans un troisième chapitre, nous aborderons les trois études menées dans leur ordre chronologique de réalisation : (1) la sélection des points de repère balises et associatifs, sous un angle exploratoire, (2) l'influence de l'observation des repères balises et associatifs, sur l'apprentissage et, (3) l'influence de la saillance perceptive sur l'observation des points de repère. Nous discuterons ces trois études dans le chapitre 7, sous un angle expérimental dans un premier temps pour ensuite aboutir aux perspectives d'adaptation des systèmes d'aide à la navigation et recommandations de prise en charge éducatives et cognitives.

CHAPITRE 1 : LA COGNITION SPATIALE

1. La navigation spatiale

Montello (2005) définit la navigation comme un mouvement du corps coordonné et dirigé vers un but. La navigation est une activité complexe qui implique des processus cognitifs tels que la perception, le raisonnement ou la mémoire, mais également des habiletés motrices. Montello divise ainsi la navigation en deux composantes qui sont la locomotion et le *wayfinding* (« trouver son chemin »). La locomotion correspond au mouvement du corps dans l'environnement directement accessible aux systèmes sensoriels et moteurs. Elle implique des questions comportementales [« behavioral problems »] (p.259) relatives à l'identification des zones permettant un appui, des zones à éviter (obstacles, barrières, parois) et des zones à atteindre (points de repère) vers lesquels s'orientent les mouvements. Les différents modes de locomotions varient entre les individus pour donner lieu à diverses activités motrices telles que la marche ou la course. En incluant l'aide des machines, on retrouve les divers modes de transports tels que le train ou les avions (Montello, 2005). Le *wayfinding* quant à lui réfère à un mouvement planifié et dirigé vers une destination distante. Les problèmes soulevés par le *wayfinding* font référence à la planification et la prise de décision (choix de routes, création de raccourcis, etc.). La navigation implique dans la majorité des situations les deux composantes (locomotion et *wayfinding*) hormis dans certaines d'entre elles, par exemple lorsque l'individu est conduit à une destination en bus ou lorsqu'il planifie un voyage en amont. Il est à noter que cette distinction est réalisée d'un point de vue littéral et non conceptuel, car ces deux composantes sont toutes deux intégrées au système de la navigation de manière conjointe.

Les processus de locomotion et de *wayfinding* ne mobilisent pas le même type de connaissances (Montello, 2005). La locomotion fait majoritairement appel à des connaissances non déclaratives. Il s'agit de connaissances procédurales et d'actes moteurs automatisés se réalisant de manière non consciente. A contrario, le *wayfinding* met en jeu des connaissances déclaratives telles que les connaissances sémantiques et épisodiques. Il résulte d'un apprentissage explicite.

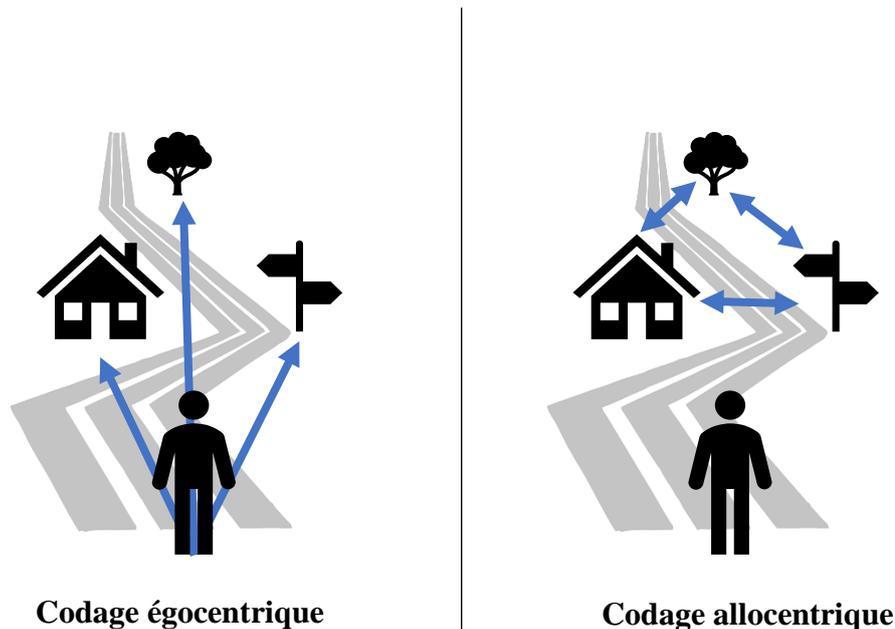
La navigation peut être active ou passive, ce qui impacte l'apprentissage. Selon Chrastil et Warren (2012), la navigation passive fait référence à une observation du chemin tout en restant immobile. La navigation dite active peut quant à elle être déclinée en 5 composantes : (1) l'implication de commandes motrices dans la détermination de la trajectoire, (2) la présence d'informations proprioceptives et vestibulaires sur le mouvement du corps, (3) l'allocation de l'attention aux caractéristiques de l'environnement, (4) la prise de décision concernant la direction à emprunter et (5) le traitement des informations spatiales. L'ensemble de ces composantes peut être regroupé en deux dimensions : les activités d'ordre physique (1 et 2) et

les activités d'ordre cognitif (3, 4 et 5). Une navigation est qualifiée d'active pour ces auteurs si elle implique au moins une de ces composantes. Lorsque la navigation est active, les participants améliorent leur reconnaissance des points de repère et leurs performances en apprentissage d'itinéraires (Hahm et al., 2007; Wallet et al., 2009).

1.2. Les cadres de référence

On distingue principalement deux cadres de référence : le système égocentrique et le système allocentrique (voir Figure 1). Le système égocentrique est une représentation dans laquelle l'espace est organisé et mémorisé en fonction de la position de l'individu. Ce système est le tout premier cadre de référence utilisé par l'enfant (voir Courbois, 2021). Le système allocentrique quant à lui est un cadre de référence dans lequel la localisation des objets est codée indépendamment de la position de l'individu. Des repères ou des caractéristiques physiques de l'environnement sont utilisés comme références. Ce système référentiel est donc extérieur à l'observateur (Denis, 2012 ; O'keefe & Nadel, 1978). Par ailleurs, on distingue aussi la stratégie égocentrique simple de la stratégie égocentrique séquentielle (Rondi-Reig et al., 2006). Cette dernière correspond à la mémorisation d'une séquence de mouvements corporels associés à des points précis de l'environnement. La personne mémorise alors l'ordre d'une séquence comportementale, qui repose sur des informations temporelles et spatiales. Le système allocentrique est important dans les déplacements. Il permet d'estimer une distance entre deux éléments sans avoir recours au corps comme référence. Faire preuve d'un bon sens de l'orientation résiderait en partie dans la capacité à utiliser de manière flexible ces deux types de cadres de référence (Kato & Takeuchi, 2003).

Figure 1. Représentation du système allocentrique et égocentrique



Le type de stratégie employée implique différentes zones cérébrales. En ayant recours à un environnement virtuel, Bohbot et al. (2004) ont réalisé une expérience de déplacement tout en enregistrant l'activité cérébrale à l'aide d'une imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Les résultats ont permis d'identifier qu'une stratégie égocentrique mène à une activation du noyau caudé du striatum tandis qu'une stratégie allocentrique implique une activation de l'hippocampe. De plus, lorsque la densité de matière grise dans le noyau caudé est importante, la probabilité qu'un individu se déplace en utilisant une stratégie égocentrique est plus élevée. Inversement, la probabilité d'utiliser une stratégie allocentrique est plus élevée lorsque la densité de matière grise est élevée dans l'hippocampe (Bohbot et al., 2007).

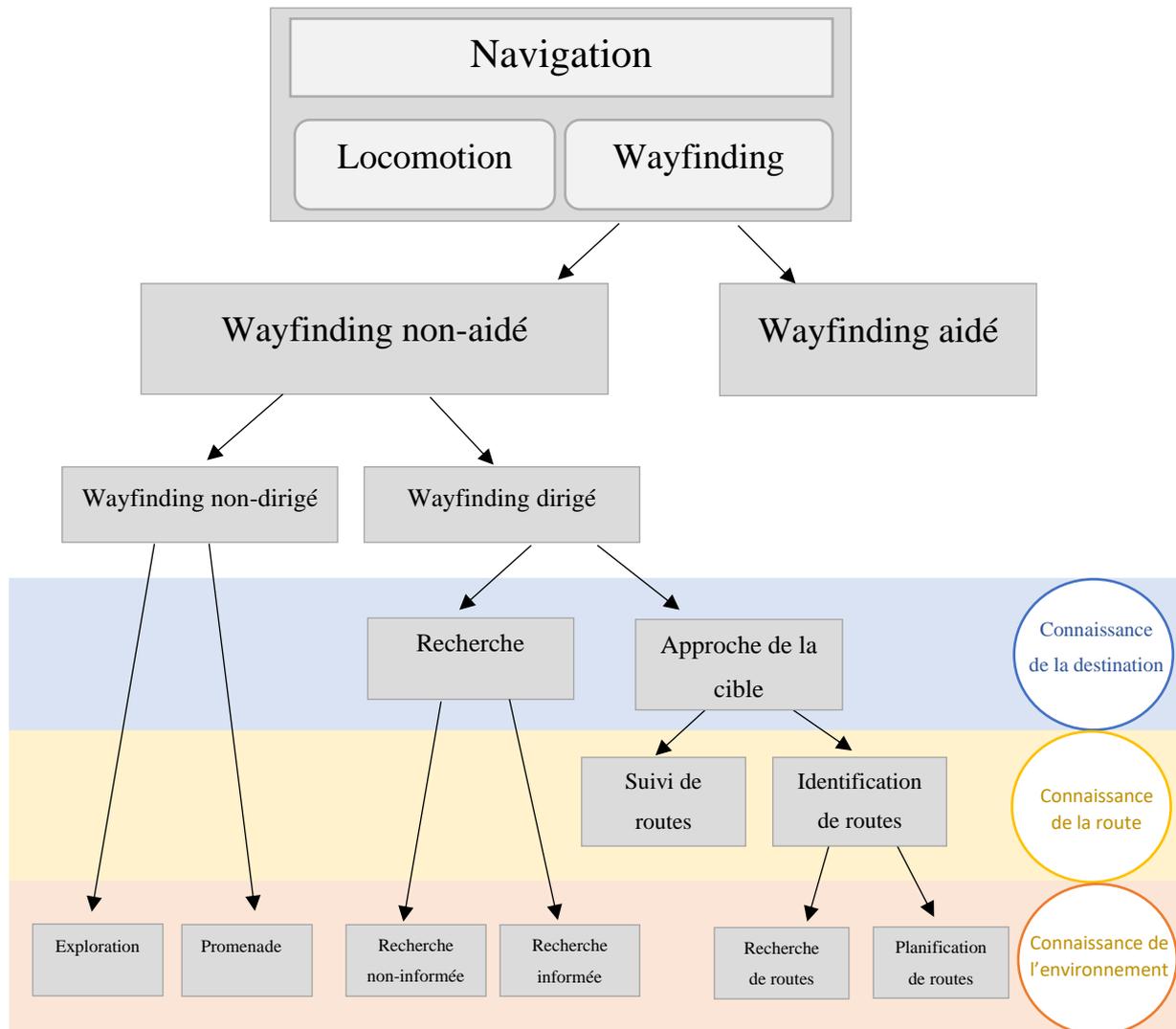
1.3. L'étude du wayfinding et la taxonomie de Wiener

Il existe une multitude de paradigmes expérimentaux pour étudier le *wayfinding*. Parmi les plus utilisés, on retrouve l'exploration, la recherche, la planification de routes, la création de raccourcis, l'apprentissage de routes et l'utilisation de cartes.

Face à cette multitude de paradigmes regroupés sous la même appellation ainsi qu'au nombre important de fonctions cognitives impliquées dans le *wayfinding*, Wiener et al. (2009) proposent une taxonomie afin de faciliter la catégorisation des différentes tâches.

Elle s'inscrit dans le prolongement des classifications réalisées en amont par divers auteurs tels que Montello (2005) ou Allen (1999). Cette classification reprend les différents types de tâches associées aux demandes cognitives qu'elles impliquent (voir Figure 2).

Figure 2. Traduction de la taxonomie de Wiener, Büchner et Hölscher (2009)



La taxonomie proposée débute par la distinction réalisée par Montello (2005) entre locomotion et *wayfinding*, ces deux dimensions n’impliquant pas les mêmes processus cognitifs. La suite du modèle se focalise sur le *wayfinding* pour investiguer la navigation dans un espace étendu.

Les auteurs distinguent le *wayfinding* aidé du *wayfinding* non aidé. Le *wayfinding* aidé correspond à un déplacement orienté à l’aide d’une carte, d’une description d’itinéraire, de panneaux, d’un système d’aide informatisé (GPS), etc. Ce type de déplacement implique des processus cognitifs spécifiques tels que l’identification de symboles, l’identification de sa position dans l’environnement ainsi que la coordination entre la représentation allocentrique fournie par la carte et la représentation égocentrique générée par l’expérience avec l’environnement (Lobben, 2004).

Au sein du *wayfinding* non aidé, les auteurs distinguent le *wayfinding* dirigé du *wayfinding* non dirigé. Le *wayfinding* dirigé réfère à un déplacement orienté vers un but (rejoindre une destination spécifique par exemple) tandis qu'un *wayfinding* non dirigé réfère à un déplacement sans objectif précis tel qu'une promenade. Conjointement, les auteurs catégorisent le *wayfinding* dirigé et non dirigé en fonction de trois niveaux de connaissances : la connaissance de la destination, la connaissance de la route menant à la destination et la connaissance de la configuration de l'environnement. Les deux premiers types de connaissances s'appliquent uniquement au *wayfinding* dirigé étant donné qu'elles font référence à une destination.

Le *wayfinding* non dirigé peut être décliné en deux types de comportement : le comportement d'exploration et la promenade. Le comportement d'exploration s'applique aux déplacements réalisés par exemple dans une ville inconnue à des fins de découverte tandis que la promenade s'applique à un déplacement pour le plaisir de la marche dans un lieu familier tel qu'une forêt.

Le *wayfinding* dirigé quant à lui peut se décliner en une situation où la personne connaît la localisation de la destination à atteindre ou non, on évoquera ainsi la notion de recherche ou d'approche de la cible.

Dans le cas d'une situation de recherche, il peut s'agir d'une recherche informée où la personne connaît l'environnement, mais ne connaît pas exactement la localisation de la cible. Il peut aussi s'agir d'une recherche non informée où la personne ne connaît ni l'environnement ni la localisation de la cible. La personne cherche ainsi un élément dans l'environnement, mais ne connaît ni sa localisation ni la configuration de l'environnement en question.

Dans le cas d'une approche de la cible, la personne peut posséder ou non une connaissance du trajet. Dans le cas d'une connaissance du trajet, la personne fera appel à ses connaissances en mémoire à long terme pour reconstituer un chemin appris par le passé (suivi de chemin). Dans le cas où la personne ne connaît pas le trajet à emprunter, il s'agira d'une tâche d'identification de trajets.

Une tâche d'identification de trajet peut quant à elle être séparée en deux types de tâches : une tâche de planification de trajets et une tâche de recherche de trajets. Dans le cas d'une tâche de planification de trajets, la personne connaît l'environnement, mais pas le chemin à réaliser. Elle planifie le chemin grâce à des inférences en se servant de ses connaissances de la configuration de l'environnement. La tâche de planification de trajets est l'élément de la taxonomie qui réfère aux processus de raisonnement les plus élaborés. A contrario, dans le cas d'une tâche de recherche de trajets, la personne ne connaît pas la configuration de l'environnement, elle

cherche le trajet à emprunter vers une destination dans un environnement non connu. Il peut s'agir d'une situation dans une ville inconnue où la personne aperçoit sa destination cible au loin (une tour par exemple), mais ne connaît pas le chemin pour l'atteindre.

Wiener et al. (2009) précisent qu'un individu fait rarement face à un seul type de tâche dans la vie quotidienne et que lors d'un même déplacement une personne peut avoir recours à plusieurs tâches décrites dans cette taxonomie. De même, ils soulignent que leur classification ne prend pas en compte les connaissances et expériences antérieures de l'individu qui peuvent influencer la réalisation de la tâche (déplacements dans des lieux possédant une structuration similaire). Néanmoins, cette taxonomie permet de distinguer les tâches entre elles, ce qui donne l'occasion d'affiner les questions de recherche et faciliter la comparaison entre les études.

En ce qui concerne les travaux de recherche de la thèse, les tâches expérimentales font appel au *wayfinding* non aidé et dirigé. Les personnes cherchent à atteindre la cible en réalisant une tâche d'identification de routes. Ils disposent de plusieurs essais pour cela. La tâche se décline lors du premier essai en une tâche de recherche non informée puis au fur et à mesure des essais devient une tâche de suivi de routes (reconstitution du chemin appris).

2. Les connaissances spatiales

2.1. La connaissance des points de repère

2.1.1. Les différents points de repère et leur influence

Un point de repère est défini comme une information souvent visuelle utilisée lors d'un déplacement pour guider l'individu dans la direction à suivre. Il peut être utilisé comme point de départ et d'arrivée ou comme destination intermédiaire. Il peut aussi servir à conserver la même direction (repère lointain par exemple) (Siegel & White, 1975). Les points de repère sont des éléments singuliers qui se détachent de l'environnement, comme un bâtiment, un objet ou une caractéristique du terrain (Chan et al., 2012; Denis, 2012). Ils sont plus facilement identifiables s'ils ont une forme claire, s'ils sont proéminents et s'ils contrastent avec l'environnement (Lynch, 1960; Sorrows & Hirtle, 1999). D'après Lynch (1960), ce dernier aspect est la principale caractéristique des repères. Par ailleurs, la notion de « reconnaissance en contexte » est nécessaire pour l'utilisation optimale des points de repère. Les personnes doivent se rappeler l'objet, de la décision qu'il implique, sa position au moment où il a été observé et le lien qu'il entretient avec les autres repères (Siegel & White, 1975).

Les points de repère ont une influence importante sur les capacités de déplacement. Jansen-Osmann et Fuchs (2006) ont montré grâce à des environnements virtuels que les itinéraires étaient mieux appris lorsque les points de repère étaient présents plutôt qu'absents aussi bien chez les adultes que chez les enfants.

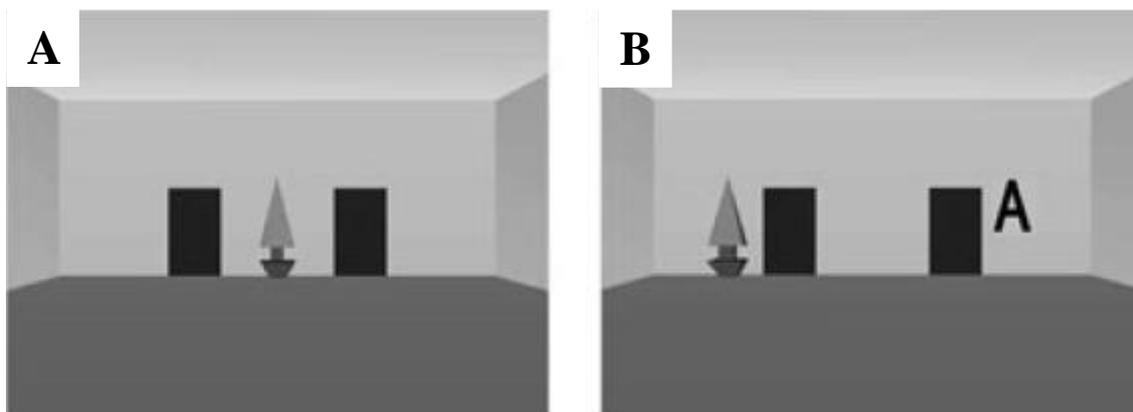
Outre la présence du point de repère, sa localisation dans l'environnement influence également l'apprentissage. Deux localisations peuvent être distinguées : proximale (ou locale) et distante (ou globale). Un repère distant est un élément visible à une grande distance tel qu'une tour ou une montagne. Il peut être utilisé comme un point de référence et ainsi favoriser l'apprentissage de la configuration de l'environnement (Castelli et al., 2008). A contrario, un repère proximal est un élément visible à une faible distance et à un endroit précis (un commerce par exemple). Les repères proximaux sont reliés en une séquence de points de référence dans l'environnement et sont plus utiles pour l'apprentissage de routes (Steck & Mallot, 2000). Afin d'étudier l'effet sur l'apprentissage de ces deux types de points de repère, Ruddle et al. (2011) ont réalisé une expérience dans laquelle les participants devaient naviguer dans 4 environnements virtuels où figuraient (1) des repères proximaux, (2) des repères distants, (3) des repères proximaux et distants, (4) ou aucun point de repère. Les résultats ont montré que le nombre d'erreurs réalisé par les participants était significativement plus faible dans le cas de l'itinéraire composé de points de repère proximaux. Ces résultats suggèrent ainsi que les repères proximaux sont plus aidants pour la navigation que les repères distants.

Plus précisément, parmi les repères proximaux, il est possible de distinguer les points de repère présents à une intersection de ceux présents le long d'un chemin. L'étude de Janzen (2006) a mis en avant l'intérêt d'utiliser les repères présents aux intersections, car ils sont plus rapidement reconnus, comparativement à ceux présents le long d'un chemin. Par ailleurs, ils peuvent servir d'aide dans la prise de décision tandis que les repères présents le long d'un chemin auront plutôt une valeur confirmatrice du choix de direction (Michon & Denis, 2001).

Enfin, on peut classifier les repères présents aux intersections en deux catégories : les repères de type associatif et de type balise (Waller & Lippa, 2007). Les points de repère dits associatifs nécessitent l'utilisation d'une information de direction telle que « à la pharmacie, prendre à droite », tandis que les repères dits balises fournissent des informations pour un déplacement de proche en proche tels que « se diriger vers la pharmacie ». Un aperçu des deux types de points de repère, positionnés près de portes à mémoriser, est présent en Figure 3. Ils se distinguent par le niveau de traitement de l'information mis en œuvre. Les repères balises nécessitent uniquement l'apprentissage par reconnaissance du repère tandis que les repères

associatifs impliquent l'apprentissage de l'association entre le repère et la direction. Grâce à l'élaboration d'environnements virtuels, ces auteurs ont montré que l'itinéraire contenant les points de repère balises permettait un apprentissage du chemin plus rapide que celui contenant les repères associatifs. Cependant, en cas de retrait des points de repère après apprentissage, l'itinéraire composé des repères associatifs était mieux restitué. Ainsi, les repères balises permettraient un apprentissage plus rapide, mais moins efficient en comparaison aux repères associatifs.

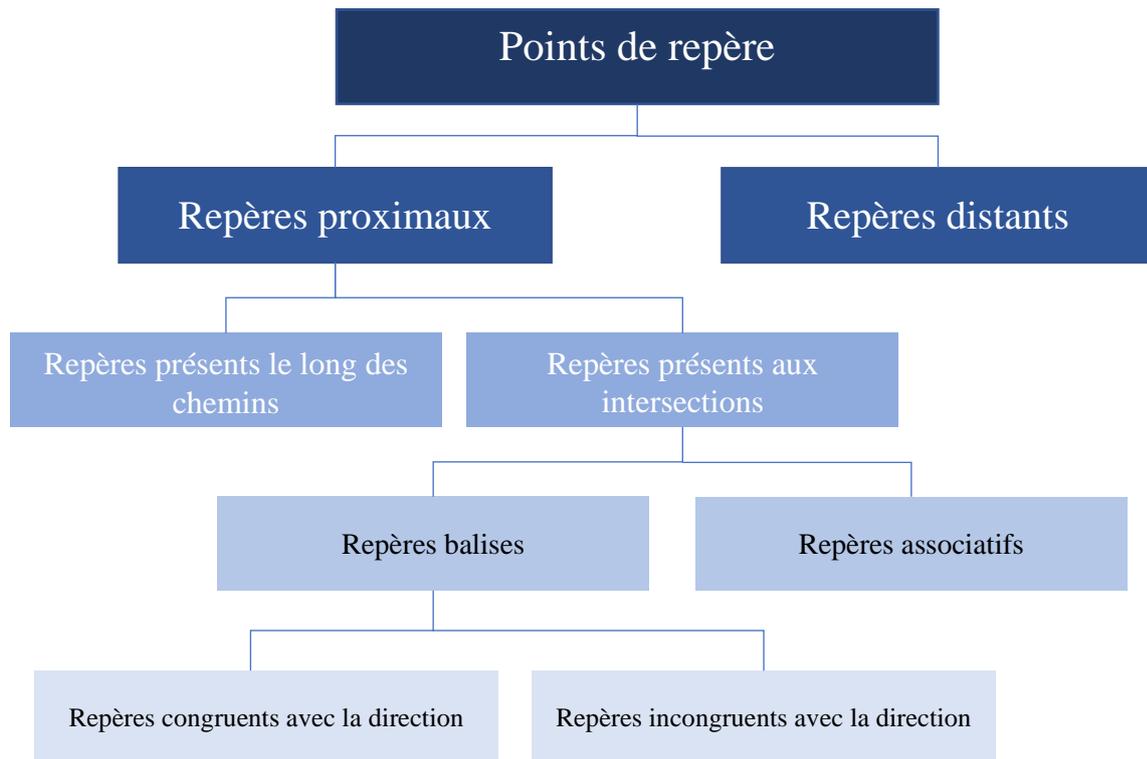
Figure 3. *Aperçu des portes à mémoriser dans l'étude de Waller et Lippa (2007)*



Note. A : condition contenant un repère associatif ; B : conditions contenant un repère balise.

Par ailleurs, selon De Condappa et Wiener (2016), les repères balises peuvent être congruents ou incongruents avec la direction à emprunter. D'autres auteurs parlent de repères adjacents au bon (congruent) ou mauvais (incongruent) chemin (Jansen-Osmann, 2002). Il s'avère que les repères adjacents au bon chemin sont mieux retenus que ceux à proximité du mauvais chemin (Jansen-Osmann, 2002) et sont également davantage observés par les participants lors de l'apprentissage d'un itinéraire (De Condappa & Wiener, 2016). Les différents points de repère sont résumés sous forme de schéma dans la Figure 4 ci-dessous.

Figure 4. Schéma récapitulatif des différents points de repère



2.1.2. La saillance des points de repère

Les points de repère peuvent être caractérisés par leur degré de saillance qui influence elle-même fortement leur sélection. Caduff et Timpf (2008) distinguent ainsi trois types de saillances : la saillance perceptive, cognitive et contextuelle.

La saillance perceptive réfère aux caractéristiques physiques des repères qui dépendent de la position de l'objet, de l'objet lui-même et de l'environnement. Ce type de saillance dépend des processus *bottom-up* (ou exogène), ce qui signifie que les caractéristiques de l'objet influencent l'allocation attentionnelle de l'individu. Un objet est considéré comme visuellement saillant s'il est suffisamment différent et s'il contraste avec les autres objets (Röser et al., 2013). La saillance perceptive réfère souvent à des caractéristiques visuelles, mais peut aussi concerner des modalités auditives ou olfactives (Hamburger & Knauff, 2019; Hamburger & Röser, 2014).

La saillance cognitive dépend quant à elle d'un processus *top-down* (ou endogène) où l'attention est orientée par les connaissances de l'individu et ses expériences. Notons que ce terme est employé ici dans le cadre de la navigation spatiale, mais qu'il a un usage différent lorsqu'il est employé dans le domaine des théories attentionnelles. Ce type de saillance dépend de la reconnaissance de l'objet et de la familiarité que l'individu entretient avec celui-ci. La

reconnaissance réfère ici à la correspondance entre une observation et les caractéristiques de la représentation mentale précédemment stockées en mémoire. La familiarité réfère quant à elle à la signification personnelle, culturelle et historique de l'objet. Elle se construit par le biais des expériences passées, des activités et des faits associés à cet objet. Il est à noter que la signification personnelle et culturelle varie en fonction des différences interindividuelles telles que l'âge, les connaissances personnelles ou la région d'habitation. La saillance cognitive peut être assimilée à la saillance sémantique qui est une notion moins large. La saillance sémantique comprend l'importance historique et culturelle de l'objet pour la communauté (et non l'individu) ainsi que les marques explicites (signes sur la devanture tels que la marque ou le nom d'un magasin) (Raubal & Winter, 2002). La majorité des études portent davantage sur le concept de saillance sémantique en comparaison avec le concept de saillance cognitive qui est difficile à évaluer (Dong, Qin, et al., 2020; Hamburger & Röser, 2014; Ligonière, 2021; Quesnot & Roche, 2014, 2015).

La saillance contextuelle réfère au cadre dans lequel s'effectue le déplacement en lien avec les ressources attentionnelles investies. Deux types de contexte peuvent être distingués : le contexte relatif à la tâche effectuée et le contexte relatif à la modalité de la tâche (notamment le mode de déplacement). Pendant la navigation, le repère sera choisi en fonction du chemin à emprunter. Par ailleurs, en fonction d'une navigation piétonne ou véhiculée, le champ de vision ainsi que la perception de l'environnement seront différents. Le terme de saillance structurelle est également employé par certains auteurs, le concept étant partiellement similaire à celui de saillance contextuelle (Klippel & Winter, 2005; Röser et al., 2012, 2013). Il s'agit de l'influence de la structure de l'environnement sur la saillance du repère. Il ne s'agit pas des propriétés du point de repère, mais de sa position dans l'environnement en lien avec la tâche. La saillance des points de repère sera influencée par l'objectif de la personne, sa direction ainsi que son mode de déplacement.

Les trois types de saillances énoncées se manifestent de manière différente en fonction des situations et des personnes. Pour étudier ce phénomène, Quesnot et Roche (2015) ont exposé des participants à des images d'intersections puis les ont questionnés sur les repères sélectionnés en faisant varier la direction. Les auteurs ont également recueilli le degré de familiarité qu'entretenaient les participants avec la ville, les personnes y vivant depuis 3 ans étant considérés comme familiers avec celle-ci. Les résultats montrent une influence de la saillance structurelle qui se traduit par une sélection préférentielle des repères positionnés sur la direction empruntée par les participants (repères balises congruents). Un effet du sexe est

également observé, les femmes étant plus influencées par la saillance structurelle que les hommes. Concernant l'influence de la familiarité avec la ville, les participants familiers ont tendance à observer les repères sur un critère de saillance sémantique tandis que les participants non familiers sélectionnent davantage les repères sur un critère de saillance visuelle. Ainsi, la familiarité entretenue avec un lieu influence les critères de sélection des repères.

2.1.3. L'étude de la connaissance et sélection des points de repère

La connaissance des points de repère peut être évaluée de plusieurs manières, la plus utilisée étant une tâche de reconnaissance. Dans cette tâche, suite à l'apprentissage d'un itinéraire, le participant est exposé à des images de repères présents ou non dans l'environnement. Le participant doit indiquer quels repères étaient présents, ce qui permet de calculer un score de reconnaissance (Farran, Courbois, Van Herwegen, & Blades, 2012; Farran et al., 2016; Keller & Sutton, 2021; Mengue-Topio et al., 2015). Certaines études effectuent quant à elles des tâches de rappel où, après avoir appris l'itinéraire, le participant rappelle librement l'ensemble des repères dont il se souvient (M. Davis et al., 2014).

Outre les tâches étudiant uniquement la mémorisation, on retrouve des tâches qui ont pour objectif d'étudier la sélection des points de repère. Une première méthode consiste à demander au participant de nommer oralement ou de pointer les repères lors de son apprentissage (Courbois et al., 2012). La sélection des points de repère peut aussi être étudiée de manière implicite en analysant les repères observés par le participant (Farran et al., 2016; Hamid et al., 2010). Ces deux types d'analyses aboutissent à des résultats différents. En comparant les deux méthodes, Viaene et al. (2014) soulignent que la référence verbale aux repères non visibles au moment de la verbalisation ne peut être fournie par l'analyse du mouvement oculaire. Inversement, les participants ne verbalisent pas ce qu'ils observent pendant la moitié du temps de trajet, ce qui montre une perte d'informations importante dans la condition verbale en comparaison à la condition analysant les mouvements oculaires.

2.2. La connaissance de routes

2.2.1. La connaissance de routes : concept et définition

La connaissance de routes comprend l'ordre séquentiel des repères, les décisions de direction ainsi que les associations entre repères et directions (Buchner & Jansen-Osmann, 2008; Siegel & White, 1975). Cette connaissance serait essentiellement de type sensorimoteur (Siegel & White, 1975). La connaissance de routes est associée majoritairement à un cadre de référence égocentrique étant donné qu'il s'agit d'une succession de prise de décisions de direction du

point de vue l'observateur (Chrastil, 2013). D'un point de vue cognitif, une route représente une séquence d'informations (Meilinger et al., 2014). Ainsi les processus cognitifs observés dans les paradigmes d'apprentissage séquentiel peuvent s'appliquer à l'apprentissage de routes (Hoffman et al., 2017). Une fois la séquence apprise, les informations seraient réduites en une seule unité d'information aussi appelée *chunk* (« la route pour l'école »).

L'apprentissage de routes peut pour certaines personnes s'effectuer de manière rapide, parfois même en une seule exposition. Lingwood et al. (2020) ont montré que des adultes étaient capables d'apprendre un trajet composé de 15 intersections via environnement virtuel en une seule exposition. Tout comme pour l'apprentissage de mots, l'apprentissage de routes est soumis à l'effet de récence et de primauté. Les éléments de la route situés au milieu sont moins bien retenus que les éléments présents au début et à la fin (Allen, 2000).

La prise de décision est une composante essentielle de l'apprentissage de routes. Lors de l'apprentissage d'un itinéraire, Chrastil et Warren (2015) distinguent la prise de décision active de l'apprentissage guidé (assimilable à la notion d'apprentissage aidé versus non aidé, dans la taxonomie de Wiener). Dans la première condition, le participant prend les décisions de direction, tandis que dans la seconde condition le participant applique les changements de direction énoncés par une personne ou observe une vidéo de l'itinéraire. Les résultats montrent qu'une prise de décision active permet un meilleur apprentissage en comparaison avec un apprentissage guidé/passif. De nombreuses études reposent sur le postulat que la prise de décision s'effectuerait au lieu même de l'intersection, néanmoins, une étude récente suggère que ce processus débute en amont. Brunyé et al. (2018) ont réalisé une étude dans un environnement virtuel qui reconstituait une ville. L'objectif était de déterminer le moment exact de prise de décision au cours des déplacements. Après une phrase d'entraînement, les participants réalisaient une tâche (de 20 essais) où l'objectif était de rejoindre un point de repère cible. Pour évaluer la prise de décision, les auteurs ont mesuré l'orientation de la tête des participants à l'approche de l'intersection. Les résultats recueillis ont montré que les participants orientaient leur tête dans la direction qu'ils comptaient emprunter, et ce quelques secondes avant l'arrivée à l'intersection. Cet effet était davantage observé lorsque les participants étaient familiers avec l'environnement. Les résultats de cette étude suggèrent qu'une partie du processus de décision est amorcée avant même de parvenir à l'intersection. Ce comportement d'anticipation peut être mis en lien avec l'utilisation d'une stratégie séquentielle égocentrique, qui correspond à la mémorisation temporelle des choix de direction ainsi que

leurs relations (Iglói et al., 2009). Ainsi, le recours à cette stratégie amènerait les participants à mémoriser une séquence de directions et à anticiper les prises de décision.

2.2.2. L'étude de la connaissance de routes

La connaissance de routes peut s'étudier de différentes manières. Le premier type de paradigme se déroule en condition réelle. L'expérimentateur montre le chemin correct à la personne en marchant puis demande à la personne de retracer à son tour ce chemin (Farran et al., 2010). L'expérimentateur note le nombre de changements de direction corrects pour établir un score. La connaissance de routes peut également s'évaluer à l'aide des environnements virtuels. Dans ce type de paradigme, le participant observe une vidéo du chemin correct puis est invité à le reproduire. L'expérimentateur note le nombre d'erreurs de direction, mais également le nombre d'essais nécessaires pour la réalisation du chemin sans erreurs, ce qui correspond au critère d'apprentissage. Dans la majorité des expérimentations, un nombre maximal d'essais est fixé pour atteindre ce critère d'apprentissage (Mengue-Topio et al., 2011).

Dans certaines expériences, au lieu de demander au participant de retracer le chemin, on utilise un test de direction. Après avoir observé l'itinéraire correct, des photographies des intersections sont présentées aux participants dans un ordre aléatoire et ils doivent indiquer la direction correcte pour chaque intersection (Grzeschik et al., 2019; Hilton et al., 2020). Ce paradigme permet de mesurer la connaissance des différents points de décision sans que le participant ne puisse s'appuyer sur la séquence des changements de direction. Inversement, un autre type de tâche est destiné à évaluer la connaissance de la séquence des points de décision rencontrés. Plusieurs photos d'intersections sont montrées deux à deux et le participant doit indiquer celle qu'il a rencontrée en premier (Hilton et al., 2020). Par ailleurs, on peut aussi demander au participant de mettre des photographies prises le long d'un itinéraire dans l'ordre du trajet (Cousins et al., 1983).

2.3. La connaissance de configuration

2.3.1. La connaissance de configuration : concept et définition

La connaissance de configuration (*survey knowledge*) également introduite sous le concept de carte cognitive par Tolman en 1948 fait référence à une représentation mentale de l'environnement composée des chemins, intersections, points de repère, quartiers et frontières (Lynch, 1960). Dans cette représentation, l'ensemble des routes s'interconnecte pour former un réseau qui conserve, dans une certaine mesure, les informations relatives aux distances et aux angles (Siegel & White, 1975). La représentation sous forme de configuration est indépendante

de la position de l'individu (représentation allocentrique). Elle permet une navigation flexible dans l'environnement, qui s'observe notamment dans les conduites de détours et de raccourcis. Cette représentation permet une multitude de choix et représente le point de départ pour l'acquisition d'informations futures (Lynch, 1960). De même, elle procure un sentiment sécurisant pour l'individu (Lynch, 1960) et facilite la communication de connaissances spatiales aux autres individus (Golledge et al., 2000).

Selon Lynch (1960) la formation d'une configuration mentale est le fruit de l'interaction entre l'individu et son environnement. En lien avec ses propres objectifs, l'individu sélectionne, organise et met du sens à ce qu'il voit, ce qui module la représentation de l'environnement. Les « images de l'environnement » varient donc entre les individus en fonction du nombre de détails qu'elles contiennent. Néanmoins, si chaque « image » est propre à chaque individu, il est possible de dégager des règles générales en fonction de l'âge, du sexe, de la culture et du lieu d'habitation. Il n'existe pas, à proprement parler, une représentation de l'environnement, mais plutôt plusieurs représentations qui se chevauchent. L'individu construirait plusieurs images qui varient en fonction de l'échelle ou du point de vue (image de la rue ou de la ville par exemple) et les mettraient en relation au prix d'un certain effort cognitif. Ces représentations peuvent également varier en fonction du moment de la journée (jour ou nuit) ou de la saison.

Les connaissances de configuration ne sont pas des représentations fidèles de l'environnement basées sur une géométrie euclidienne (Downs & Stea, 1973). Elles font l'objet de distorsions qui résultent de traitements cognitifs. À titre d'exemple, les personnes ont tendance à mal estimer la direction ainsi que la distance entre deux endroits en fonction du nombre de virages qui relient les deux lieux (Meilinger et al., 2018). De surcroît, les individus ont tendance à déformer les angles entre les segments de chemins, ce qui peut aller jusqu'à créer des configurations impossibles (Moar & Bower, 1983).

Chrastil (2013) évoque la notion de connaissance graphique de l'environnement (*graph knowledge*). La connaissance graphique s'imbriquerait entre la connaissance de routes et la connaissance de configuration. Cette connaissance engendre, elle aussi, la capacité à inférer une nouvelle route entre deux destinations sans avoir parcouru ce déplacement.

2.3.2. L'étude de la connaissance de configuration

L'étude de la connaissance de configuration peut se faire à l'aide de plusieurs types de tâches. Le premier type de tâche est l'estimation de direction. Dans ce type de protocole, il est demandé au participant d'estimer l'emplacement de différents points de repère en fonction d'une position

dans l'environnement. La réussite à la tâche est évaluée grâce à l'erreur absolue (exprimée en degré) entre la position donnée et la position correcte (Keller & Sutton, 2021).

Une autre manière d'évaluer cette connaissance consiste à tester la capacité à créer un raccourci. Des chemins allant d'un point A vers B sont montrés, puis de B vers C, il est ensuite demandé au participant d'effectuer un chemin de A vers C qu'il n'a pas réalisé au préalable (Boone et al., 2018; Chrastil & Warren, 2015; Mengue-Topio et al., 2011). La réussite à la tâche est évaluée en fonction de la distance effectuée pour raccorder ces deux points.

Le paradigme du dessin de carte (*map drawing*) est également utilisé pour évaluer la capacité des participants à former une carte cognitive. D'après Lynch (1960), les éléments fondamentaux d'un dessin de carte sont : les chemins, les bords, les quartiers, les croisements ainsi que les points de repère. Néanmoins, ce mode d'évaluation a été remis en question, car il est fortement influencé par les habiletés motrices de l'individu et il est difficile d'interpréter les résultats (Morganti et al., 2007).

Enfin, la capacité à former une carte cognitive peut se faire au travers d'une tâche de placement de points de repère sur une carte. Dans leur étude, Castelli et al. (2008) invitent les participants à visionner un chemin puis réaliser une phase d'exploration libre. Ensuite, lors de la phase de test, les participants placent sur une carte en 2D les différents points de repère. Un score est calculé en mesurant la distance entre l'objet placé et la position réelle de l'objet.

2.4. L'acquisition des connaissances spatiales

Les connaissances spatiales évoluent sensiblement pendant l'enfance. Siegel et White (1975) proposent un modèle en 3 étapes, chacune d'elles correspondant à un niveau d'élaboration des connaissances spatiales. La première étape concerne la sélection et la mémorisation des points de repère. La seconde est la construction d'itinéraires où il s'agit de relier les points de repère entre eux afin de former un chemin défini. Enfin, la troisième étape concerne la formation d'une carte cognitive dans laquelle les différents itinéraires sont reliés entre eux en conservant les informations métriques et angulaires. Les recherches ultérieures suggèrent cependant que l'acquisition de ces différents niveaux de connaissance s'effectuerait graduellement plutôt que par étapes successives (Courbois, 2021).

Outre le développement des connaissances spatiales à travers les âges, la question de l'ordre d'acquisition de ces connaissances dans une situation d'apprentissage se pose également. Siegel et White (1975) postulent que lors de la première exposition à un environnement les individus passent par les trois étapes d'acquisition (points de repère, itinéraire et carte cognitive) de

manière séquentielle. Or, cet aspect a été remis en question en raison de la forte variabilité interindividuelle quant à l'acquisition des connaissances de configuration. En effet, il s'avère que certaines personnes accèdent directement à une connaissance de routes et de configuration, et ce dès la première exposition (Ishikawa & Montello, 2006). De surcroît, Kim et Bock (2021) ont étudié l'acquisition de ces trois étapes chez les adultes dans une tâche d'orientation en environnement virtuel à travers 10 essais. Les résultats montrent que les participants développent les trois types de connaissances, et ce dès le premier essai. Les liens entre les trois types de connaissances accroissent au fur et à mesure des essais. L'ensemble de ces travaux suggère donc que ces trois processus se développent en parallèle et en interaction.

Afin de valider le modèle proposé par Siegel et White (1975), Cousins et al. (1983) ont réalisé une étude auprès d'enfants âgés de 7, 10 et 13 ans au sein de leur campus scolaire. Les participants ont été amenés à effectuer plusieurs tâches testant leur capacité à atteindre une destination (création d'un chemin), connaissances des repères, des routes ainsi que de la configuration de l'environnement. Les résultats montrent que l'ensemble des participants réussissent à s'orienter pour atteindre une destination, néanmoins on observe des différences entre les âges pour les autres tâches. Au plus les participants ont un âge élevé, au plus leurs compétences sont précises, ce qui va dans le sens des prédictions réalisées à partir du modèle de Siegel et White. Par ailleurs, afin d'identifier l'influence de l'âge sur l'utilisation d'une stratégie basée sur la mémorisation d'une séquence de changements de direction ou les points de repère, Lingwood et al. (2015) ont réalisé une expérience en environnement virtuel où les participants étaient amenés à apprendre un itinéraire avec ou sans points de repère. Les résultats ont montré que les enfants âgés de 6 et 8 ans éprouvent des difficultés à apprendre un itinéraire sans points de repère. La majorité des enfants de 10 ans parviennent à réaliser cet apprentissage, mais montrent tout de même des performances plus faibles que les adultes. Par conséquent, la stratégie d'orientation basée sur la mémorisation d'une séquence de changements de direction se développe à partir de l'âge de 10 ans pour se perfectionner ensuite. En ce sens, la majorité des enfants âgés de 12 ans parviennent à apprendre un chemin long (12 intersections) sans erreurs, ce qui est possible par un tiers des enfants âgés de 8 ans (Lingwood et al., 2018). Concernant l'acquisition des connaissances de configuration, les enfants âgés de 7 et 8 ans sont moins performants dans la création de raccourcis que les enfants de 9 et 10 ans, ce qui suggère que la représentation de type carte cognitive commence à être acquise à l'âge de 9 ans (Burlus et al., 2020).

S'agissant de la capacité à sélectionner les points de repère, cette compétence évolue aussi avec l'âge. En effet, Nys et al. (2015) ont montré que si les enfants âgés de 10 ans mentionnent davantage les repères présents aux intersections plutôt que les repères présents le long des chemins, ce résultat ne s'observe pas dans le cas des enfants âgés de 6 et 8 ans. Ainsi d'un point de vue développemental, la sélection des points de repère en lien avec leur fonction évolue avec l'âge. Il en va de même pour la capacité à placer un repère sur une carte, qui s'améliore entre 6 et 10 ans. De surcroît, une autre étude réalisée par Lehnung et al. (1998) montre l'utilisation de stratégies d'orientation différentes en fonction de l'âge. Les enfants âgés de 5 ans ont tendance à utiliser une stratégie centrée sur les repères proximaux tandis que les enfants de 10 ans ont recours à une stratégie basée sur les repères distants. D'après les auteurs, le développement de la stratégie basée sur les repères distants est en transition à l'âge de 7 ans pour être complet à l'âge de 10 ans. En ce qui concerne la capacité à utiliser les repères, il a été montré que les enfants sont capables d'utiliser des repères distants et proximaux pour mettre en place une stratégie allocentrique dès 5 ans, mais que cette stratégie se perfectionne jusque l'âge de 10 ans (Bullens et al., 2010). De même, lorsqu'uniquement des repères distants sont présents, les enfants âgés de 5 à 6 ans sont capables d'y avoir recours pour apprendre un itinéraire (Purser et al., 2015).

2.5. Quels sont les facteurs qui influencent les capacités de wayfinding ?

Les capacités de *wayfinding* peuvent être influencées par de nombreux facteurs. Plusieurs études suggèrent que les hommes apprennent des nouveaux trajets plus rapidement et en faisant moins d'erreurs de direction que les femmes (Moffat et al., 1998; Tlauka et al., 2005). Il semblerait que ces résultats soient liés à l'utilisation de stratégies différentes. Les hommes auraient tendance à se baser davantage sur des évaluations de distances et des référentiels géocentrés (points cardinaux) tandis que les femmes utiliseraient plutôt les points de repère et les directions (Dabbs et al., 1998). En somme, les hommes utiliseraient plus des stratégies basées sur la connaissance de la configuration, alors que les femmes utiliseraient des stratégies basées sur la connaissance de routes. Castelli et al. (2008) montrent que les hommes parviennent mieux à indiquer la direction de différents points de repère (tâche de pointage) ainsi qu'à les positionner sur une carte en 2D, ce qui témoigne d'une meilleure connaissance de la configuration de l'environnement (pour revue, voir Coluccia & Louse, 2004). Des différences ont également été observées chez des enfants dans une tâche d'exploration spatiale. Les garçons auraient une stratégie d'exploration plus active et plus efficace de l'environnement que les filles (Farran et al., 2022). L'origine de ces différences est multiple, mais nous pouvons nous

interroger sur l'effet de l'expérience de déplacement permise en fonction du sexe pendant l'enfance. Selon l'environnement social et culturel, l'exploration libre de l'espace est souvent plus restreinte chez les filles que les garçons, ce qui contribuerait aux différences relevées à l'âge adulte (Courbois, 2021; Farran et al., 2022).

Les capacités de déplacement sont également influencées par l'âge. Les études montrent que les personnes âgées ont de plus faibles performances en apprentissage de routes (Hartmeyer et al., 2017; Moffat et al., 2001) et éprouvent des difficultés plus importantes lorsqu'il s'agit d'effectuer un chemin dans le sens inverse (Wiener, Kmecova, et al., 2012). Elles ont aussi besoin de plus de temps pour former une représentation de type carte cognitive (Iaria et al., 2009). Ces difficultés seraient liées à un dysfonctionnement de l'hippocampe, impliqué dans une représentation allocentrée de l'environnement (Moffat et al., 2006).

Le *wayfinding* est également fortement influencé par la mémoire de travail. Les travaux de Wen et al. (2011, 2013) montrent que les personnes se différencient sur l'utilisation des différentes composantes de la mémoire de travail (verbales, visuelles et spatiales) lors des déplacements. Les auteurs évaluent ces dimensions à l'aide du paradigme de la double tâche. Il s'agit de demander aux participants de réaliser une tâche interférente en même temps que la tâche principale. Dans le cas où la tâche interférente mobilise les mêmes ressources que la tâche principale, alors les performances de la tâche principale diminuent. Les auteurs ont identifié que les personnes avec un faible sens de l'orientation ont davantage tendance à utiliser les composantes verbales de la mémoire de travail, ce qui représenterait un frein à l'accès à une représentation allocentrique. A contrario, les personnes possédant un bon sens de l'orientation feraient appel aux trois composantes de la mémoire de travail en simultané.

Outre les caractéristiques individuelles, les activités quotidiennes peuvent également exercer une influence sur les capacités de déplacement. Plusieurs études ont montré l'influence de la fréquence d'utilisation des jeux vidéo sur les capacités de navigation spatiale. Murias et al. (2016) ont montré que les personnes jouant depuis longtemps aux jeux vidéo (impliquant la navigation) ont de meilleures performances aux tâches de navigation et utilisent des stratégies plus élaborées impliquant une représentation de type carte cognitive. Les mêmes résultats ont été montrés par Ventura et al. (2013) qui constatent une influence du type de jeux sur les performances de navigation, notamment au niveau du degré de similarité entre les jeux joués et les tâches de navigation. De surcroît, certaines études ont montré l'influence des jeux vidéo sur les structures cérébrales. Il s'avère que la pratique régulière de ceux-ci augmente le volume ainsi que l'activité du striatum tout en diminuant l'activité ainsi que le volume de l'hippocampe.

De fait, les personnes jouant régulièrement à ces jeux ont davantage recours à une stratégie de type « réponse » (égocentrique) plutôt qu'une stratégie allocentrique (West et al., 2015).

La familiarité qu'entretient l'individu avec son environnement influence également ses capacités de navigation, son niveau de connaissances spatiales et sa sélection des points de repère (Mengue-Topio et al., 2015). Lynch (1960) a ainsi montré que les personnes non familières avec l'environnement allaient davantage sélectionner les repères globaux tandis que les personnes familières se basaient davantage sur les repères locaux pour s'orienter. La familiarité avec un certain type d'environnement (urbain ou rural) influence aussi les capacités de déplacement. Coutrot et al. (2022) ont étudié auprès de 397 162 personnes le lien existant entre les capacités de navigation spatiale et le lieu dans lequel les participants ont grandi. Les résultats montrent que les personnes ont de meilleures capacités de déplacements dans les environnements virtuels où la structure est similaire aux endroits dans lesquels ils ont grandi. Par exemple, un individu ayant grandi dans un milieu composé d'un réseau routier élevé aura de meilleures capacités de déplacement dans un environnement virtuel composé du même type de réseau routier.

Enfin, il s'avère également que le niveau de stress influence les capacités de déplacement de l'individu. Brown et al. (2020) ont montré que les personnes mises en situation de stress ont moins recours à des raccourcis et utilisent davantage des chemins familiers. Ce résultat est expliqué par l'activation de l'hippocampe par le stress qui réduit ainsi l'accès à cette zone cérébrale pour la mise en place d'une représentation de type carte cognitive.

3. Les systèmes d'aide à la navigation

Les systèmes d'aide à la navigation permettent de faciliter la réalisation de déplacements, notamment lorsqu'il s'agit de nouveaux trajets. Ils permettent aux individus de réaliser un *wayfinding* aidé (Wiener et al., 2009), ce qui engendre un plus faible niveau de charge cognitive qu'un *wayfinding* non aidé. L'utilisation d'un système d'aide implique cependant la mobilisation de processus cognitifs propres à l'utilisation de l'outil et à la coordination entre la représentation spatiale fournie par celui-ci et celle que l'individu a de son environnement (Lobben, 2004).

3.1. Les systèmes d'aide à la navigation : quels avantages et inconvénients ?

Les systèmes d'aide à la navigation produisent des indications de direction dites de « pas-à-pas » en étant composées d'une suite d'actions. Ces systèmes ont été développés il y a une vingtaine d'années dans le domaine de l'automobile (Grison & Gyselinck, 2019). Outre leur vocation principale qui est d'atteindre une destination, ils ont été créés d'après trois objectifs : (1) la diminution de l'anxiété et du stress liés à l'orientation, (2) l'augmentation de la sécurité en comparaison avec les autres stratégies d'aide aux déplacements moins sécuritaires (3) et l'accroissement de la confiance du conducteur ainsi que l'augmentation de la réalisation de trajets dans des lieux non familiers (Burnett, 2000). Plusieurs séries de travaux ont été menées afin d'adapter au mieux ces instruments au fonctionnement cognitif humain (Grison & Gyselinck, 2019). Allen (2000) a réalisé une série d'expérimentations afin de définir les assistances verbales les plus efficaces. Il a ainsi montré qu'il était préférable de présenter les directions dans l'ordre spatio-temporel correct, concentrer les informations aux points de décision et avoir recours à des désignations spatiales connues par les individus. De plus, en s'appuyant sur le fonctionnement de la mémoire de travail, l'aide apportée serait plus efficace si elle repose sur les modalités visuelles et verbales, ce qui permet un double encodage (Taylor et al., 2008). En ce qui concerne le type d'information à fournir, May et al. (2003) ont étudié les types d'éléments que les individus préfèrent utiliser lorsqu'ils se déplacent dans un centre-ville complexe. Les résultats montrent que les participants utilisent préférentiellement les points de repère et préfèrent utiliser le nom du repère plutôt que sa catégorie (employer le terme « Auchan » plutôt que dire « le supermarché ») lorsque la personne est familière au lieu. De même, les informations telles que la distance ou le nom de la rue sont utilisées peu fréquemment. En ce qui concerne les informations, comme énoncé précédemment il est préférable qu'elles soient communiquées aux points de décision, mais aussi entre ces points pour favoriser la confiance de l'utilisateur et confirmer qu'il a pris une bonne direction.

L'utilisation des systèmes d'aide à la navigation a amené à s'interroger sur l'impact négatif que ce type d'aide pourrait avoir sur les capacités cognitives. Ainsi, Münzer et al. (2006) ont comparé les connaissances spatiales acquises par les piétons lors d'une navigation dans un zoo. Les participants ont réalisé un déplacement soit à l'aide d'un système d'aide à la navigation, soit à l'aide d'une carte. Ils ont réalisé des tests pour évaluer leurs connaissances des routes et de la configuration. Les résultats montrent que les participants ayant réalisé le déplacement avec une carte ont de meilleures connaissances des routes ainsi que de la configuration. D'après les auteurs, cette différence est due à l'investissement cognitif supplémentaire réalisé par les

participants qui doivent s'orienter avec la carte. Les difficultés d'utilisation liées à la nouveauté de la technologie ainsi que l'observation régulière de l'écran peuvent aussi impacter l'apprentissage (Ishikawa et al., 2008). En effet, les écrans GPS ne permettent pas d'afficher la carte entièrement, ce qui conduit à regarder plus souvent l'écran pour obtenir des informations. En conséquence, l'observation régulière de l'écran restreint le focus attentionnel des participants à cette zone plutôt qu'à l'environnement. D'après Parush et al. (2007), la faible acquisition des connaissances spatiales pourrait également s'expliquer par un faible investissement en termes d'effort mental durant la réalisation d'un déplacement aidé, ce qui correspond à l'interprétation de Münzer et al. (2006).

Il s'avère également que l'utilisation prolongée des systèmes d'aide à la navigation peut impacter les habiletés spatiales. Ruginski et al. (2019) ont étudié l'influence d'une utilisation quotidienne des systèmes d'aide à la navigation sur les habiletés à imaginer des transformations spatiales. Pour ce faire, les auteurs ont interrogé les participants sur leur fréquence d'utilisation des systèmes d'aide et les ont fait réaliser des tâches de rotation mentale ainsi que de changement de perspective. Les résultats montrent que l'utilisation régulière de systèmes d'aide est associée à une réduction des capacités de transformation spatiale qui sont communes aux tâches de prise de perspective et de rotation mentale. Les auteurs expliquent ces résultats par une diminution du besoin d'imaginer la transformation spatiale lors de l'utilisation des systèmes d'aide, ce qui diminuerait par conséquent l'entraînement de ces habiletés.

3.2. Quels points de repère fournir aux utilisateurs ?

Dans le cas des systèmes d'aide à la navigation pour piétons, il a été montré que les points de repère augmentent les performances ainsi que la confiance de l'utilisateur (May et al., 2003; Ross et al., 2004). Ce type d'aide à la navigation suppose cependant que les systèmes soient capables d'identifier les repères pour les intégrer aux indications de direction. C'est en réponse à cette problématique que les travaux basés sur la détection automatique des points de repère (*Automatic Landmark Detection Systems*) ont vu le jour (Sadeghian & Kantardzic, 2008). La première approche de détection automatique des points de repère a été proposée par Raubal et Winter en 2002. Les auteurs calculent à l'aide de 3 formes de saillance (visuelle, sémantique et structurelle) une somme pondérée afin de déterminer un score de saillance pour chaque point de repère. À la suite de ces travaux, Elias (2003) a proposé une approche similaire basée sur l'utilisation du *machine learning* pour identifier les points de repère les plus saillants. Puis, Winter et al. (2008) ont combiné ces deux approches pour réaliser une hiérarchie des points de

repère à partir de la saillance. Duckham et al. (2010) ont également créé un algorithme permettant d'inclure un point de repère à chaque intersection. À l'inverse des autres systèmes de détection, ils se basent sur des catégories plutôt que sur les caractéristiques individuelles de chaque point de repère. Ainsi, le logiciel se connecte à une base de données géographique contenant des points d'intérêt qui sont associés à des catégories trouvées dans les Pages Jaunes (hôtels, restaurants, églises, etc.). Ces catégories sont elles-mêmes évaluées sur la base de critères tels que la taille ou la familiarité pour donner lieu à un score. Ce score est pris en compte pour le calcul d'un score total de saillance comprenant d'autres paramètres tels que la distance à la route ou la différence par rapport à l'environnement.

Suite à cette étape d'identification, les points de repère sont intégrés dans des systèmes permettant la génération d'instructions (Richter, 2013). Ainsi, la hiérarchie réalisée par Winter et al. (2008) a été utilisée pour générer des indications de direction par Tomko et Winter (2009). Des travaux ont également été réalisés par ces deux auteurs afin d'établir un système d'assistance personnalisé. Le principe du système développé permet de personnaliser les itinéraires en fonction de la familiarité qu'entretient la personne avec l'environnement (Tomko & Winter, 2006). Les travaux de ces auteurs se sont basés sur leurs observations des indications données par les personnes ayant une connaissance de la ville. Ces indications sont adaptées au début et à la fin de l'itinéraire. Les instructions en début d'itinéraire sont peu détaillées puis accroissent en détail au fur et à mesure de l'approche de la destination. Ces auteurs ont ainsi proposé une manière de générer automatiquement ce type d'indication.

Néanmoins, Richter (2013) indique qu'il existe plusieurs freins à l'intégration des points de repère dans les systèmes d'aide. Dans un premier temps, en fonction de l'approche utilisée (repères sélectionnés d'après leurs caractéristiques individuelles ou d'après des catégories), la mise en place en termes de quantités de données est plus ou moins réalisable. En effet, le recours à des points de repère sélectionnés d'après leurs caractéristiques individuelles nécessite une collecte et un stockage de données pour chaque ville et lieu, ce qui en fait un système difficilement faisable. Il est plus pertinent d'après Richter d'utiliser l'approche par catégorie proposée par Duckham et al. (2010). Dans un second temps, une autre limite est le nombre insuffisant de points de repère récoltés en fonction des différents territoires, ce qui crée une grande variation dans les itinéraires. Ainsi, le défi actuel est de recueillir un nombre suffisant de points de repère, ce à quoi une possible solution serait la contribution des utilisateurs pour la collecte des données.

4. Les environnements virtuels et l'oculométrie

4.1 Les environnements virtuels

Les environnements virtuels (EV) sont définis comme étant « fondés sur l'interaction en temps réel avec un monde artificiel, à l'aide d'interfaces comportementales permettant l'immersion "pseudo-naturelle" de(s) l'utilisateur(s) dans cet environnement. Ce monde artificiel est imaginaire ou une simulation de certains aspects du monde réel » (Fuchs, 1996, cité par Lourdeaux, 2001, p. 11). Les EV ont été utilisés dans des domaines d'études très variés tels que l'évaluation de la mémoire prospective (Mathews et al., 2016), le travail des habiletés quotidiennes et sociales (Charitos et al., 2000 ; Didehbani et al., 2016) la diminution de la douleur lors des soins hospitaliers (Khadra et al., 2018) ou la navigation spatiale (Gyselinck et al., 2013).

Dans le contexte de la navigation spatiale, les EV permettent d'évaluer les capacités de déplacement en évitant certaines contraintes telles que la fatigue physique et le temps d'expérimentation (Courbois, Mengue-Topio, et al., 2013). Ils permettent aux chercheurs de manipuler et contrôler les variables susceptibles d'influencer le déplacement. Ils donnent aussi l'occasion de réaliser plusieurs essais aisément pour mesurer le nombre d'expositions nécessaires à l'apprentissage. Le fait d'avoir recours aux EV permet de contrôler le degré de familiarité qu'entretient le participant avec l'environnement, ce qui n'est pas toujours aisé en environnement réel. Néanmoins, dans la majorité des études, ils ne reproduisent pas l'entièreté des conditions motrices et sensorielles auxquels sont soumis les participants lors d'un déplacement réel, car ils ne reproduisent pas le comportement de marche ou les sons présents dans l'environnement par exemple. Ainsi, les EV sont un outil à utiliser de manière complémentaire aux autres méthodes d'étude du déplacement (Courbois, Mengue-Topio, et al., 2013). Il est important de noter que certaines études récentes tentent néanmoins de remédier à ce problème en jumelant les EV à des tapis de marche (Geisen et al., 2021).

Plusieurs auteurs ont reproduit en EV des recherches réalisées en environnement réel pour vérifier s'ils obtenaient les mêmes résultats. Par exemple, Jansen-Osmann et Berendt (2002) ont reproduit l'expérience de Sadalla et Magel (1980) et ont retrouvé les mêmes résultats concernant l'estimation de distances en EV. Une route était estimée comme plus longue si elle contenait plus de changements de direction. De même, Ruddle et al. (1997) ont montré que les participants avaient les mêmes aptitudes lors d'une tâche de jugement de directions et d'estimation de distances que les participants de l'expérience de Thorndyke et Hayes-Roth

(1982) qui avaient réalisé l'expérimentation en condition réelle. Waller (2000) a aussi montré que les résultats obtenus par le biais d'EV sont prédictifs des résultats observés en conditions réelles.

Il s'avère aussi que les apprentissages réalisés en EV peuvent se transférer aux situations réelles. Waller et al. (1998) ont montré qu'un entraînement via exposition longue à un EV immersif permettait d'obtenir en condition réelle des performances en connaissance de routes similaires aux individus entraînés dans un environnement réel. L'efficacité des EV pour entraîner les capacités de déplacement et les capacités motrices a aussi été montrée auprès de populations cliniques telles que les personnes présentant une déficience intellectuelle (Rose et al., 2002). Dans cette étude, les participants réalisaient en EV deux expérimentations, une sur la navigation spatiale et une sur l'apprentissage moteur. La première expérience montre que les personnes présentant une DI parviennent mieux à apprendre la disposition spatiale d'un bungalow lorsqu'ils réalisent un apprentissage actif (déplacement avec un joystick) plutôt que passif (simplement regarder la vidéo). La seconde expérience montre que l'entraînement de compétences motrices en EV permet d'améliorer ces mêmes compétences en condition réelle. Ces deux expériences montrent que les personnes présentant une DI sont motivées par l'apprentissage en EV et que cet entraînement permet d'améliorer des compétences à des tâches réalisées en condition réelle.

Ainsi, si les EV ne recouvrent pas l'ensemble des dimensions sensorielles et motrices impliquées dans les déplacements (notamment la locomotion) ils permettent néanmoins d'étudier les processus cognitifs impliqués ainsi qu'entraîner ces habiletés.

4.2. Les mouvements oculaires

4.2.1. L'oculométrie

D'un point de vue historique, le premier usage de l'oculométrie de manière non invasive a été réalisé par Gus Thomas Buswell au cours des années 1930 (Buswell, 1935). Il s'agissait pour ces premiers travaux d'analyser les mouvements oculaires des personnes lorsqu'ils regardaient des photos d'éléments artistiques. Plusieurs années après, Alfred Yarbus a réalisé une étude pionnière dans l'analyse des mouvements oculaires (Yarbus, 1967). Cet auteur a montré grâce à une tâche d'observation de photographies que les mouvements oculaires différaient en fonction des consignes données par l'expérimentateur. Les consignes variaient entre une exploration libre, la mémorisation d'éléments et des tâches de jugements (donner l'âge des participants, deviner ce que les personnages effectuaient avant la scène, etc.). Les résultats

montrent qu'en fonction de l'information que le participant doit obtenir la répartition des points de fixation sur les objets sera différente.

D'un point de vue méthodologique, la technologie d'analyse du mouvement des yeux a progressé depuis ces travaux pionniers afin de récolter des données de plus en plus précises. L'oculométrie permet aujourd'hui d'enregistrer en temps réel la position du regard grâce à un détecteur optique ou une caméra vidéo qui capte le reflet émit par un rayon infrarouge projeté sur la cornée oculaire (Baccino, 2002). Les outils utilisés peuvent se présenter sous la forme d'une barre d'oculométrie ou bien de lunettes embarquées (voir Figure 5 pour un exemple du matériel).

Figure 5. Exemple d'outils utilisés pour l'oculométrie



A : Barre d'oculométrie ; B : Lunettes embarquées

4.2.2. Les paramètres oculaires

4.2.2.1. Les fixations et saccades

L'enregistrement des mouvements oculaires permet d'avoir accès principalement à deux paramètres oculaires : les fixations et les saccades.

Les fixations représentent l'arrêt de l'œil sur une zone, ce qui indique son traitement cognitif. Elles permettent l'analyse de l'information en détail. La zone observée est projetée sur la fovéa, au centre de la rétine qui est la zone possédant la meilleure résolution visuelle (Curcio et al., 1990; Pouget, 2019). En moyenne, une fixation dure entre 200 et 300 millisecondes (Holmqvist et al., 2011). La durée d'une fixation est influencée par de nombreux facteurs tels que les caractéristiques de la scène (complexité de l'environnement, nombre d'éléments, etc.), l'objectif de la tâche, mais aussi les processus cognitifs déployés par l'individu comme la mémoire ou l'attention (Rayner, 2009).

Les saccades quant à elles représentent le mouvement de l'œil d'une zone de fixation à une autre. Ce mouvement oculaire est utilisé pour repositionner la fovéa sur une autre zone de l'environnement. Elles renseignent sur les processus perceptifs ainsi que le contrôle oculomoteur (Baccino, 2002). Les paramètres de la saccade étudiés sont le nombre, la durée, l'amplitude, la direction ainsi que le pic de vitesse. En moyenne, une saccade dure entre 30 et 80 millisecondes (Holmqvist et al., 2011). L'amplitude de la saccade correspond à la distance parcourue par l'œil (en degré) pendant la réalisation du mouvement oculaire. Lors d'une exploration libre, l'amplitude d'une saccade est dans 86 % des cas inférieure à 15° (Bahill et al., 1975 cités par Bahill & Stark, 1975). L'amplitude des saccades durant l'exploration d'une scène n'est pas constante et diminue au fur et à mesure de l'exploration visuelle (Unema et al., 2005). Lors de l'exploration d'une scène, la direction d'une saccade s'effectue plus fréquemment de manière horizontale que verticale (Tatler & Vincent, 2008).

4.2.2.2. *Le diamètre de la pupille*

L'oculométrie permet également d'avoir accès au diamètre de la pupille. Les premières recherches initiées en pupillométrie ont été réalisées par Hess et Polt en 1964. Grâce à des observations réalisées lors d'une tâche de multiplications, ces chercheurs ont montré une augmentation de la taille de la pupille en lien avec la difficulté du traitement à réaliser. Durant la même période, Kahneman et Beatty (1966) ont montré un lien entre la taille de la pupille et la quantité d'informations à conserver en mémoire. Ils ont mesuré lors d'une tâche d'empan que plus le sujet devait mémoriser un nombre important de chiffres au plus la taille de la pupille augmentait. De même, la taille de la pupille augmentait au moment de l'encodage et diminuait au moment du rappel. Néanmoins, si la taille de la pupille augmente jusqu'à une certaine quantité d'informations à mémoriser, au-delà d'un certain nombre, la taille reste constante (Peavler, 1974).

Le diamètre de la pupille permet d'extraire trois mesures : la dilatation de la pupille, le pic de vitesse de dilatation et la latence du pic. La dilatation moyenne de la pupille correspond à la différence entre la taille moyenne observée avant la présentation du stimulus (mesure de base dans une situation neutre) et la taille moyenne pendant la présentation du stimulus. Le pic de vitesse de dilatation correspond à la valeur maximale atteinte par la dilatation pupillaire. Enfin, la latence du pic correspond au temps écoulé entre la présentation du stimulus et la manifestation du pic de vitesse de dilatation (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000). La moyenne de la dilatation de la pupille est la mesure la plus utilisée par les études.

La mesure du diamètre de la pupille nécessite cependant certaines précautions. Dans un premier temps, elle est très sensible aux variations lumineuses (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000). Un éclairage élevé aura pour effet de restreindre la taille de la pupille tandis qu'un éclairage faible produira une dilatation entraînant une augmentation de la taille. Il est donc important de contrôler et maintenir les mêmes conditions lumineuses durant la réalisation d'une expérimentation ainsi que contrôler la luminosité des stimuli présentés à l'écran (Klingner et al., 2008).

Dans un second temps, les données issues du diamètre de la pupille nécessitent certains traitements. Afin de recueillir la dilatation de la pupille, il est nécessaire d'établir une mesure de base avant l'essai (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000) qui peut varier en fonction des études de 150 millisecondes à 2 secondes (Lemercier, 2014). La mesure de base doit être répétée pour chaque essai en raison de la variabilité de la mesure chez un même individu (Reilly et al., 2021). Le recours à la dilatation de la pupille permet de diminuer les différences interindividuelles concernant la taille de la pupille. Le second traitement à réaliser concerne le remplacement des valeurs manquantes. En raison du clignement des yeux, mouvements de tête et observations hors de l'écran, un certain nombre de données sont absentes. La méthode d'interpolation linéaire est souvent utilisée par les chercheurs afin de remplacer ces données. Le seuil de 50 % des données manquantes est souvent appliqué par les chercheurs pour ne pas prendre en considération les données de l'essai en cours (Alnæs et al., 2014; Angulo-Chavira et al., 2017). Enfin, le troisième traitement à réaliser concerne le filtrage des données. Il s'agit d'appliquer un filtre passe-bas (basé sur la moyenne mobile) pour lisser les données et ainsi réduire le bruit. D'après Hupé et al. (2009) il est recommandé de réaliser un filtrage à une valeur de 10 Hz qui s'ajuste le mieux à la dynamique de dilatation de la pupille.

4.2.3. Les facteurs d'influence de l'exploration visuelle

L'exploration visuelle d'une scène est influencée par des facteurs de bas niveau (*bottom-up*) tels que les propriétés visuelles de la scène observée, mais également par des facteurs de haut niveau (*top-down*) tels que les processus cognitifs, mais également par le type de tâche effectuée (Theeuwes, 2010). Nous parlerons ainsi d'attention exogène lorsqu'elle est régie par des processus de bas niveau et d'attention endogène lorsqu'elle est régie par des processus de haut niveau.

L'influence des processus *bottom-up* peut être mise en évidence avec une tâche de recherche visuelle. Dans ce type de tâche, il est demandé au participant de détecter une cible le plus rapidement possible parmi un ensemble de distracteurs. La cible peut se distinguer des autres

distracteurs par sa couleur, son orientation ou sa taille. Si le temps de détection de la cible n'est pas influencé par le nombre de distracteurs, alors il s'agira d'un traitement réalisé par les processus *bottom-up* (Treisman & Gelade, 1980). Cette absence d'effet du nombre de distracteurs serait liée à un traitement réalisé en parallèle, on parlera ainsi de traitement pré-attentionnel (*preattentive processing*).

La sélection d'après un processus *top-down* peut être illustrée par la tâche réalisée par Posner (1980). Dans cette tâche de détection de cible, les participants reçoivent une indication concernant la future position de la cible. Les résultats montrent que les participants sont plus rapides et commettent moins d'erreurs lorsque la cible apparaît à la position indiquée que lorsqu'elle apparaît à une autre position. Cette expérience montre ainsi l'influence des processus de haut niveau sur l'allocation d'attention.

5. L'apport de l'oculométrie dans l'étude de la navigation spatiale

5.1. Études au sein de la population générale

De nombreuses études ont recours aux tâches informatisées afin d'investiguer les capacités de déplacement. De fait, la question de la transférabilité des comportements oculaires mesurés dans ces environnements à ceux effectués en condition réelle se pose. Pour répondre à cette question, Dong, Liao, et al. (2020) ont enregistré les mouvements oculaires de 82 participants lors de la réalisation de tâches de navigation dans une condition réelle et dans une condition informatisée (logiciel similaire à *Google Street View*). Les résultats montrent qu'en condition réelle les participants passent un temps supérieur à observer la route, les autres individus et les objets en mouvement, en comparaison avec la condition informatisée. Néanmoins, la fréquence des fixations est semblable entre les deux groupes. La différence entre les mouvements oculaires réalisés en conditions réelles et en réalité virtuelle a aussi été testée. Les résultats ont montré que si les performances de déplacement sont identiques dans les deux conditions, les mouvements oculaires semblent se différencier. Le traitement visuel qui correspond à l'interprétation et l'utilisation de l'information visuelle (mesuré par la durée moyenne des fixations et la fréquence des fixations) semble plus efficace en environnement réel. Inversement, la recherche visuelle qui correspond au balayage de l'environnement pour la recherche d'un objet (mesurée par la fréquence des saccades ainsi que la durée, l'amplitude et la vélocité moyenne des saccades) est quant à elle plus efficace en réalité virtuelle (Dong et al., 2022).

Wiener, Hölscher et al. (2012) ont étudié l'influence de l'environnement sur les prises de décision. Lors d'une première expérience, 20 participants ont été exposés à des captures d'écran d'intersections où ils devaient indiquer une réponse de direction (gauche ou droite) pour retrouver un objet caché. Les expérimentateurs ont analysé l'influence des propriétés géométriques des chemins et intersections (longueur de la ligne de vue du chemin, nombre de bords verticaux et horizontaux). Les résultats montrent que les participants observent davantage les directions avec une longue ligne de vue (chemin avec un horizon lointain). Ce résultat a aussi été observé par Emo (2014) en présentant des photographies d'intersections de la ville de Londres.

Phillips (2015) a également investigué l'influence de la complexité d'un EV sur les fixations oculaires. Pour ce faire, cet auteur a comparé les mouvements oculaires effectués durant une tâche de navigation via « Google Street View » (environnement complexe) et « Minecraft » (environnement épuré) auprès de 10 participants. Les résultats ont montré que les participants effectuaient un temps total de fixations plus élevé ainsi qu'une fréquence de fixations par minute plus élevée dans la condition impliquant un environnement complexe. A contrario, la durée moyenne des fixations est plus faible en environnement complexe. Ce résultat est expliqué par un nombre plus faible d'informations, ce qui sollicite davantage la vision périphérique pour observer les dimensions spatiales plutôt que la vision fovéale qui est utilisée pour extraire les informations des repères.

Allen et Kirasic (2003) ont également étudié les mouvements oculaires pour mesurer les différences d'allocation d'attention en fonction des informations présentes sur la route à apprendre. Les participants ont été exposés à 61 photos d'intersections qui représentaient un itinéraire de 1km dans un quartier urbain, tout en effectuant une tâche concurrente dans laquelle ils devaient presser un bouton lors de l'apparition d'un signal sonore. Pour catégoriser les zones informatives, une étude préliminaire a été menée auprès de 50 participants, qui ont évalué chaque zone en attribuant un score de 1 à 5 (valeur informative/utile basse à élevée). Les résultats montrent que les patterns d'exploration visuelle sont différents selon que la zone est informative ou non. Les patterns visuels en zones informatives correspondent à des saccades entre les points de repère et les points de fuite du chemin tandis que lors des zones non informatives les saccades se concentrent d'une zone périphérique à l'autre. De même, le désengagement attentionnel sera plus long lors de l'observation des zones informatives.

Hamid et al. (2010) ont quant à eux étudié l'observation des points de repère en lien avec les performances de déplacement auprès de 40 étudiants. Lors de cette expérience, les participants

se sont déplacés dans l'environnement virtuel avec pour consigne de le mémoriser. Après la phase d'apprentissage, les participants ont été positionnés à un point et ont eu pour consigne de se rendre à un autre point le plus rapidement possible. Enfin, lors d'une troisième phase, les participants ont été exposés à une photo d'intersection dont ils devaient indiquer la position dans l'environnement ainsi que l'orientation. Lors de cette phase, les participants réalisaient deux conditions, une où l'entièreté des repères étaient présents et une autre où uniquement la moitié étaient présents (les repères les plus observés ou les moins observés lors de la phase d'apprentissage). Les résultats montrent que les repères les plus observés sont ceux présents aux jonctions en L, T et à la fin d'un couloir. Par ailleurs, les auteurs observent une diminution des performances des participants uniquement lorsque les repères les plus observés sont retirés de l'environnement. Ces résultats montrent que les repères les plus regardés en phase d'apprentissage sont ceux sur lesquels les participants se basent pour s'orienter dans l'environnement, ce qui laisse à penser que les durées de fixation reflètent l'encodage des repères.

Wenczel et al. (2017) se sont intéressés à l'influence de l'apprentissage d'itinéraires de manière incidentelle ou intentionnelle sur les mouvements oculaires. Lors de leur étude, les participants ont réalisé en condition réelle une partie de l'itinéraire sans consigne de mémorisation, puis la seconde partie du chemin en sachant qu'ils effectueraient une tâche de description de routes. Les résultats indiquent que l'intention d'apprendre influence davantage le regard sur les repères saillants structurellement (situés à l'angle de l'intersection). En effet, les participants passent plus de temps à observer ces repères lorsqu'ils ont l'intention d'apprendre l'itinéraire. A contrario, le temps passé à observer les repères saillants visuellement n'est pas influencé par l'intention d'apprentissage. Dans un autre domaine, Phillips (2015) a investigué l'influence d'une navigation active et passive sur les mouvements oculaires. Lors de cette expérience, 10 participants ont été soit transportés passivement dans un environnement virtuel issu de « Google Street View », soit ont exploré l'environnement de manière active. Les résultats montrent que les participants effectuent un nombre de fixations plus faible sur les repères dans la condition passive, ce qui indique une attention plus faible portée envers les points de repère lorsque l'exploration est passive.

De même Dong, Qin, et al. (2020) ont étudié l'influence de la saillance visuelle et sémantique sur les comportements oculaires lors d'une navigation réelle au sein d'un bâtiment. Il s'avère que contrairement aux résultats observés sur des images statiques (résultats de Henderson &

Hayes, 2017) la saillance visuelle des points de repère attire davantage l'attention que la saillance sémantique.

Andersen et al. (2012) ont quant à eux investi les différences d'observation des points de repère entre hommes et femmes lors d'une tâche de recherche d'objets. Les participants sont exposés à 5 environnements virtuels différents où varient le nombre de points de repère et le design de l'environnement. Les résultats montrent que les femmes effectuent plus d'erreurs et complètent la tâche plus lentement que les hommes lorsque peu de points de repère sont présents, tandis qu'il n'y a pas de différence lorsque l'environnement est riche en points de repère. De même, les données oculaires rapportent que les femmes effectuent un nombre plus élevé de fixations sur les points de repère que les hommes. Conjointement, Dong, Zhan, et al. (2020) ont étudié les différences de comportements oculaires entre hommes et femmes lors d'une décision de direction à l'aide d'une carte et de photos d'intersections. Les participants étaient placés devant un écran divisé en deux parties (la carte et l'intersection) et devaient indiquer la direction correcte pour atteindre la destination mentionnée sur la carte. Les images ont été analysées d'après 5 zones d'intérêt : la route, les bâtiments, les indications écrites, les autres objets de l'environnement (voitures, végétation, etc.) et la carte. Les résultats obtenus montrent que les hommes effectuent un nombre plus important de fixations sur la route que les femmes, ce qui ne s'observe pas pour les autres éléments de l'environnement et sur la carte. De même, les femmes effectuent plus de changements attentionnels entre la carte et les éléments écrits de l'environnement que les hommes. Ainsi, ces deux études montrent que les femmes ont davantage recours aux points de repère pour s'orienter tandis que les hommes semblent baser leur orientation sur la configuration de l'environnement telle que les repères géométriques fournis par les routes.

Outre la sélection et la mémorisation des points de repère, des chercheurs ont également étudié le lien entre la formation d'une carte cognitive, les compétences spatiales et les comportements visuels. Dans une étude réalisée auprès de 85 participants, Keller et Sutton (2021) ont évalué les compétences spatiales (dont la prise de perspective mentale) à l'aide de tests papier avant la réalisation d'une tâche de navigation. Par la suite, ils ont enregistré les mouvements oculaires des participants lors d'une tâche d'exploration en EV, puis ont évalué la reconnaissance des points de repère, la capacité à estimer les directions et la construction d'une carte cognitive et d'un itinéraire. Les résultats ont montré qu'il n'existait pas de différence de temps d'observation des points de repère et autres objets de l'environnement entre les participants avec un niveau de précision élevée dans la formation de carte cognitive et les participants avec un niveau faible.

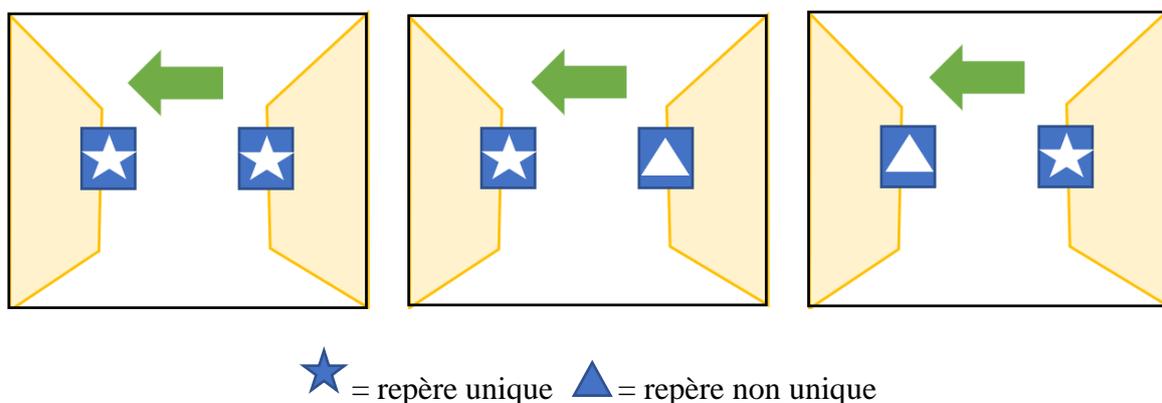
Néanmoins, si les deux groupes observent de manière similaire les repères, les participants ayant un niveau de performance élevé dans la formation d'une carte cognitive mémorisent davantage de points de repère. Enfin, les résultats montrent que les participants avec un niveau de précision élevé dans la formation d'une carte cognitive ont de meilleures performances dans la tâche de prise de perspective mentale. Ainsi, d'après cette étude, les différences d'accès à la représentation de type carte cognitive ne seraient pas liées à des processus attentionnels, mais aux processus cognitifs survenant après l'observation de l'environnement tels que la prise de perspective mentale.

Les mouvements oculaires associés aux différents types de stratégies ont été étudiés par Livingstone-Lee et al. (2011) via un EV qui reproduit la tâche du labyrinthe de Morris (*Water Maze Task*) (Morris, 1984). Lors de cette tâche, les participants doivent retrouver une plateforme visible ou invisible en partant de différentes localisations dans une arène carrée. Des repères sont positionnés sur les murs de l'arène pour faciliter l'orientation. Deux labyrinthes ont été créés afin d'inciter le recours à une stratégie égocentrique (localiser la cible en fonction de sa position) ou allocentrique (localiser la cible en fonction de points de repère externes). Les résultats montrent que lors de la condition allocentrique les participants effectuent des fixations au centre de l'écran ou vers l'horizon (repère distant), ce qui correspond aux indices utilisés pour s'orienter. A contrario, lors de la condition égocentrique, les participants observent les trois repères proches de la cible, ce qui indique qu'ils se basent sur des repères proximaux pour s'orienter. Ces résultats suggèrent qu'il est possible d'identifier la stratégie employée par un participant grâce à ses mouvements oculaires, et ce dès les premières secondes.

Afin d'étudier les comportements visuels réalisés au cours des déplacements, Wiener et al. (2011) ont étudié l'orientation du regard avant la prise de décision et par quels éléments elle est modulée. Il s'agit ici d'appliquer « l'effet du biais de regard » à la question des déplacements. Ce biais correspond à une orientation préférentielle des yeux en direction de la réponse choisie quelques millisecondes avant la prise de décision (Shimojo et al., 2003). Lors de cette expérience, 17 participants ont réalisé une tâche d'apprentissage de routes en EV composée de repères uniques et/ou non uniques. Les repères uniques sont des repères présents à une seule intersection et les repères non uniques sont présents à deux intersections. Les repères uniques sont donc plus aidants pour l'apprentissage des directions. Lors de la phase d'apprentissage, les participants ont observé une vidéo d'un chemin à mémoriser composée de 18 intersections. Les intersections présentées étaient divisées en trois catégories (contenant 6 intersections chacune) en fonction des repères présents et de la direction à emprunter : (1) deux repères

uniques avec une direction allant dans le sens d'un repère unique ; (2) un repère unique et un non unique avec une direction allant dans le sens du repère unique ; (3) un repère unique et un non unique avec une direction allant dans le sens du repère non unique (voir Figure 6). Lors d'une phase de test, les participants ont été exposés aux photos des 18 intersections dans un ordre aléatoire et devaient indiquer la direction correcte. Chaque participant était ainsi exposé aux 3 types d'intersections. Ce protocole avait pour objectif de mesurer si l'orientation du regard était liée aux informations utilisées pour la prise de décision (observation des repères uniques) ou à la direction empruntée (observation du repère positionné à l'entrée du chemin correct qu'il soit unique ou non unique). Les résultats montrent que le temps de réponse est plus long lorsque la direction correcte est dans le sens du repère non unique. Concernant l'orientation du regard, trois patterns sont mesurés en fonction du type d'intersection. Lorsque les deux repères sont uniques, les participants observent la direction à emprunter 500 ms avant la prise de décision. Lorsqu'un repère unique et non unique sont présents et que la direction va dans le sens du repère unique, les participants observent dans le sens de la direction à emprunter dès 1500 ms avant leur réponse. Enfin, lorsque la direction va dans le sens du repère non unique, les participants observent le repère unique dans un premier temps (de 1500 ms à 400 ms) puis réorientent leur regard dans la direction à emprunter 400 ms avant de donner leur réponse. Ces résultats montrent que si l'on regarde majoritairement dans le sens de la direction à prendre avant de donner une réponse, cet effet peut être modulé par les informations nécessaires à l'orientation.

Figure 6. *Illustration des trois types d'intersections du protocole utilisé par Wiener et al. (2011)*



L'*eye-tracking* peut également être utilisé afin d'évaluer l'effet de la pratique sur l'amélioration du focus attentionnel. Geisen et al. (2021) ont évalué les comportements visuels lors des prises de décision aux intersections en EV à travers 6 essais. Les résultats montrent qu'au fur et à mesure des essais, les participants vont diminuer le temps passé à observer la direction non empruntée, mais garder constant le temps d'observation de la direction qu'ils empruntent. Ce changement attentionnel est davantage prononcé chez les personnes ayant un bon sens de l'orientation. Ces résultats permettent de montrer qu'une pratique répétée d'une tâche de déplacement permet d'améliorer le traitement attentionnel de l'environnement effectué par les participants.

Enfin, les mouvements oculaires peuvent également être utilisés pour évaluer l'efficacité d'un système d'aide à la navigation dans un bâtiment. Ohm et al. (2017) ont ainsi évalué l'efficacité de systèmes d'aide basés sur les points de repère ayant soit recours à une interface abstraite montrant uniquement une partie de l'itinéraire, soit à une interface sous forme de carte montrant l'entièreté de l'étage. Ils ont ainsi montré qu'une interface abstraite permet aux participants de s'orienter plus rapidement et nécessite moins de traitements visuels. En effet, les participants vont dans cette condition réaliser moins de fixations visuelles sur l'écran et ainsi se concentrer davantage sur l'orientation.

En conclusion, les études réalisées avec l'oculométrie pour étudier la navigation spatiale ont investi plusieurs champs d'études. Les questions de recherches se concentrent majoritairement sur l'influence des propriétés de l'environnement (configurations spatiales, caractéristiques des points de repère), l'influence des caractéristiques individuelles (âge, sexe), mais aussi l'influence des supports de visualisation de l'environnement. L'oculométrie permet également d'éclairer les différentes stratégies utilisées lors des déplacements et mieux comprendre les erreurs qui peuvent en découler. Les principaux résultats mettent en avant un traitement visuel qui diffère en fonction d'un déplacement réel ou en réalité virtuelle, mais également en fonction de la complexité de l'environnement virtuel. Les différents processus cognitifs mobilisés par les individus peuvent être étudiés au travers des paramètres oculaires, comme c'est le cas par exemple de la mémorisation d'un repère qui se reflète par sa durée de fixation. Les mouvements oculaires permettent de mieux comprendre le processus de prise de décision ainsi que différencier une stratégie spatiale égocentrique d'une stratégie allocentrique. Enfin, l'âge et le sexe des individus influencent le temps qu'ils allouent aux différents éléments de l'environnement, notamment les points de repère.

5.2. Études auprès de populations cliniques

Des équipes de recherche ont également fait appel à l'oculométrie afin de mieux comprendre les difficultés de déplacement de certaines populations cliniques. Les études auprès des personnes présentant une déficience intellectuelle seront abordées dans la partie prévue à cet effet.

Un premier champ de recherche s'est intéressé aux difficultés de déplacement rencontrées par les personnes âgées, notamment en lien avec les troubles attentionnels liés à l'âge. Grzeschik et al. (2019) ont étudié en EV l'observation des points de repère des personnes âgées en comparaison avec de jeunes adultes lors d'un apprentissage de routes. Les auteurs ont fait varier la saillance perceptive des repères en s'appuyant sur une approche subjective (questionnaire où le participant indique l'objet qui ressort le plus d'après une échelle en 7 points) et objective (carte de saillance). Les résultats révèlent que les deux groupes passent un temps supérieur à observer les objets saillants plutôt que non saillants, et ce sans différence entre les groupes. Néanmoins, les participants âgés observent durant moins longtemps les repères uniques, mais passent un temps supérieur à observer les zones sans points de repère. Ces comportements d'observations pourraient expliquer le nombre d'erreurs plus important effectué par les personnes âgées lors de l'apprentissage de routes. A contrario, Hilton et al. (2020) ont étudié les processus visuels des sujets âgés et jeunes lors de l'apprentissage d'une route dans un EV reproduisant une ville. Les résultats obtenus par ces auteurs ne permettent pas de montrer des différences entre les deux groupes concernant l'observation des repères avant la prise de décision, la dispersion du regard ainsi que les paramètres oculaires. Les auteurs rapportent uniquement une différence concernant la vitesse moyenne des saccades entre les deux groupes, les personnes âgées ayant une vitesse plus faible. Les auteurs concluent ainsi que les différences d'apprentissage entre les groupes ne sont pas liées à des stratégies visuelles différentes.

Conjointement, Davis et Sikorskii (2020) ont étudié l'observation des repères en lien avec la saillance perceptive auprès des personnes présentant une maladie d'Alzheimer. Les résultats obtenus montrent que les personnes avec une maladie d'Alzheimer passent moins de temps à observer les repères saillants visuellement et observent davantage les repères non saillants en comparaison avec des personnes du même âge. Ces résultats sont expliqués par des difficultés à mémoriser les repères pertinents ainsi que par une allocation importante des ressources attentionnelles sur l'action physique de déplacement. De même, le temps supérieur passé à observer les repères non saillants est expliqué par des difficultés à désengager leur attention.

D'autres recherches ont étudié les mouvements oculaires réalisés par les personnes présentant un Trouble du Spectre Autistique (TSA). Ring et al. (2018) ont répliqué l'expérience de De Condappa et Wiener (2016) afin d'identifier si les personnes avec un TSA observent d'une manière différente les intersections au cours d'un apprentissage d'itinéraire. Les résultats montrent que les personnes avec un TSA observent durant moins de temps les points de repère en comparaison avec les participants typiques.

Dans l'ensemble, ces recherches suggèrent que l'oculométrie est un outil intéressant pour étudier les difficultés rencontrées par les populations cliniques. Dans le cas des personnes avec des difficultés de communication, elle offre des informations supplémentaires sans avoir à passer par le langage. Par ailleurs, les difficultés en attention visuelle étant souvent présentes dans certaines pathologies telles que la maladie d'Alzheimer ou la déficience intellectuelle, elle permet d'étudier l'influence directe des difficultés attentionnelles sur l'apprentissage des connaissances spatiales. Ainsi, elle permet d'expliquer une partie des difficultés rencontrées par une observation plus faible des points de repère qui sont des éléments essentiels dans l'acquisition d'une connaissance de l'environnement.

6. La charge cognitive, un concept applicable aux déplacements ?

Outre les travaux portant sur l'analyse des fixations oculaires et les saccades, plusieurs équipes de recherche ont étudié la dilatation pupillaire associée à l'apprentissage d'un itinéraire. La dilatation pupillaire est utilisée dans ces études comme indicateur du niveau de la charge cognitive.

6.1. La théorie de la charge cognitive

La théorie de la charge cognitive a été introduite par John Sweller en 1988. Elle fait référence à l'« intensité du traitement cognitif mis en œuvre par un individu lorsqu'il réalise une tâche donnée dans un contexte particulier » (Chanquoy et al., 2007, p.248). Ainsi, la charge cognitive dépend à la fois de la tâche et de l'individu qui la réalise. D'après ces auteurs l'intensité du traitement cognitif dépend de plusieurs éléments : le nombre d'informations et leur niveau d'interactivité entre elles, les connaissances de l'individu en lien avec la tâche, les stratégies employées, les interférences, la proximité sensorielle ou cognitive entre les traitements à réaliser ainsi que l'effort que l'individu souhaite ou peut réaliser.

D'après Sweller (1994, 2010), il existerait 3 catégories de charge cognitive : la charge intrinsèque (*intrinsic*), la charge extrinsèque (*extraneous*) et la charge pertinente (*germane*).

La charge intrinsèque est liée à l'information traitée par l'individu. De manière plus précise, il s'agit de la quantité d'informations qui doivent être traitées simultanément et par conséquent qui ont un niveau d'interactivité entre-elles. À titre d'exemple, Chanquoy et al. (2007) évoquent le cas d'une personne apprenant une nouvelle langue. Si cette personne apprend deux mots de vocabulaires distincts, l'apprentissage d'un mot n'a aucune incidence sur l'apprentissage de l'autre mot, ainsi on estime que ces deux mots ont un faible niveau d'interactivité (donc leur apprentissage requiert un faible niveau de charge intrinsèque). A contrario, une personne apprenant la syntaxe devra traiter simultanément les différentes règles, ce qui en fait une tâche avec un haut niveau de charge intrinsèque. Le fait de réaliser un traitement de plusieurs éléments de manière simultanée crée une charge importante en mémoire de travail. Ainsi, si la quantité d'informations influe sur le niveau de charge intrinsèque c'est surtout l'interactivité entre les éléments qui influence le niveau de charge, que le nombre d'informations soit élevé ou faible.

La charge cognitive extrinsèque correspond à l'allocation de ressources cognitives dans des éléments qui ne sont pas nécessaires pour effectuer la tâche (Chanquoy et al., 2007). Il peut s'agir par exemple des consignes ou du mode de présentation de la tâche. La charge intrinsèque étant compliquée à réduire sans impacter la compréhension, la charge extrinsèque est le premier élément à viser lorsqu'il s'agit de réduire la charge cognitive. La charge cognitive extrinsèque est importante à considérer uniquement lorsque la charge intrinsèque est élevée. Si la charge intrinsèque est faible, la charge extrinsèque n'est pas censée influencer l'exécution de la tâche. Inversement, en cas de charge intrinsèque élevée, la charge extrinsèque peut jouer un rôle important sur la surcharge de la mémoire de travail.

Enfin, la charge cognitive pertinente (ou utile) concerne les ressources employées dans l'acquisition et l'automatisation de schémas en mémoire à long terme (Chanquoy et al., 2007). Ce type de charge est dite pertinente, car elle est nécessaire aux apprentissages. Les trois formes de charges étant additives, il est nécessaire qu'un espace suffisant soit laissé par les deux autres types de charges afin que des ressources puissent être allouées à la charge pertinente. De même, la charge cognitive pertinente est influencée par l'écart entre la connaissance apprise et celle possédée par l'apprenant (Bellec & Tricot, 2013). Ainsi, au moins l'apprenant possède de connaissances, au plus la charge pertinente sera importante.

6.2. Les outils de mesure de la charge cognitive

6.2.1. Mesures subjectives

La charge cognitive peut se mesurer de manière subjective à l'aide de questionnaires où il est demandé à l'individu d'évaluer le niveau de charge cognitive qu'il a ressenti pendant la réalisation de la tâche. L'un des questionnaires les plus utilisés est le « *NASA Task Load Index* » (Hart & Staveland, 1988). Ce questionnaire est composé de 6 sous-échelles : l'effort, la frustration, les demandes temporelles, la performance, la demande mentale et la demande physique. En réponse à des questions, la personne se positionne sur une échelle de Likert allant de « faible » à « élevée ». Cet outil est utilisé dans de nombreux domaines allant du trafic aérien aux professions médicales (Hart, 2006). On retrouve également le « *Subjective Workload Assessment Technique* » (SWAT) (Reid & Nygren, 1988) qui comporte 3 dimensions : le temps de charge, la charge d'effort mental et la charge de stress psychologique. Enfin, le test du « *Workload Profile* » (Tsang & Velazquez, 1996) est également utilisé. Dans ce test, les participants sont amenés à évaluer la proportion de ressources attentionnelles allouées à divers types de ressources : le traitement visuel, spatial, verbal et auditif, la sélection et l'exécution des réponses, le traitement perceptif et enfin la sortie manuelle et vocale.

Les propriétés psychométriques de ces trois outils ont été comparées lors de la réalisation de deux tâches en laboratoire (Rubio et al., 2004). Les résultats montrent que le test du « *Workload Profile* » est davantage sensible aux variations de la tâche et montre de meilleures qualités diagnostiques. Néanmoins, la « *NASA Task Load Index* » est davantage corrélée aux performances à la tâche.

6.2.2. Mesures objectives

Dans le champ de l'analyse des mouvements oculaires, d'autres indicateurs que la pupille peuvent être utilisés pour déterminer le niveau de charge cognitive. Parmi, ces indicateurs nous retrouvons les clignements des yeux. Plusieurs études ont montré que le clignement des yeux diminuait avec l'augmentation de la charge cognitive (Cain, 2007; Huang et al., 1994). Cependant, d'autres études obtiennent des résultats inverses (Magliacano et al., 2020). Cette différence de résultats pourrait s'expliquer par la nature de la tâche. En effet, d'après les résultats de Magliacano et collaborateurs, lorsqu'une tâche n'implique pas l'attention visuelle, les clignements des yeux augmentent avec le niveau de charge cognitive. Les fixations et les saccades peuvent être aussi des indicateurs du niveau de charge cognitive. Les résultats de plusieurs études montrent que la durée des fixations augmente avec le niveau de charge

cognitive (Chen et al., 2011; Just & Carpenter, 1976). Concernant les saccades, la vitesse ainsi que l'amplitude diminuent avec l'augmentation de la charge cognitive (Di Stasi et al., 2010; Pang et al., 2020). D'autres indicateurs sont également utilisés pour mesurer le niveau de charge cognitive tels que les rythmes cérébraux et le rythme cardiaque (Cranford et al., 2014; Gevins & Smith, 2003; Ryu & Myung, 2005; Veltman & Gaillard, 1998).

Le paradigme de la double tâche permet également de mesurer de manière indirecte le niveau de charge cognitive. Dans ce type de paradigme, le participant effectue la tâche principale tout en effectuant une tâche secondaire continue et simple telle qu'une tâche de tapping (Sun & Shea, 2016). On mesure le niveau de charge cognitive en fonction des performances réalisées lors de la tâche secondaire. Cependant, cette mesure comporte des limites. En effet, cette méthode affecte la tâche principale et est également plus sensible lorsque la tâche secondaire mesure des processus proches de la tâche principale, ce qui accroît davantage le risque d'interférences (Chanquoy et al., 2007).

6.2.3. Mesures mixtes

Les techniques de mesure objectives et subjectives de la charge cognitive montrent chacune des points forts ainsi que des points faibles. Par exemple, si la dilatation pupillaire est un bon indice de charge cognitive, cette mesure ne permet pas d'identifier quel élément de la tâche influence le niveau de charge cognitive, ce que peuvent mesurer les techniques subjectives (Cegarra & Chevalier, 2008). De même, les mesures objectives sont moins sensibles aux variations de charge cognitive au sein d'une même tâche. En réponse à ces limites, des chercheurs ont mis au point des mesures mixtes en combinant à la fois des mesures objectives et subjectives. Cegarra et Chevalier (2008) ont créé l'outil « THOLOS » qui permet de fusionner une mesure basée sur les performances à une tâche secondaire à celles mesurées physiologiquement (dilatation pupillaire) et subjectivement (score au *Nasa-TLX*). Cet outil permet ainsi d'expliquer les variations d'une mesure par une autre et de prendre en considération l'ensemble des dimensions de la charge cognitive.

D'autres auteurs ont quant à eux couplé plusieurs mesures physiologiques de la charge cognitive. Ryu et Myung (2005) ont mesuré les rythmes alpha, les clignements des yeux ainsi que le rythme cardiaque de manière simultanée lors de la réalisation d'une double tâche. Leurs résultats ont montré que la sensibilité des différentes mesures variait en fonction du type de tâche. En effet, les rythmes alpha sont sensibles aux demandes en mémoire tandis que les clignements des yeux et rythmes cardiaques sont plus sensibles aux demandes perceptives. Il

est ainsi recommandé d'utiliser plusieurs mesures physiologiques lorsqu'il s'agit d'étudier la charge cognitive lors d'une double tâche.

6.3. La dilatation pupillaire associée à la réalisation d'une tâche cognitive

Comme énoncé précédemment, l'une des premières études ayant utilisé le diamètre de la pupille en tant qu'indice de la charge cognitive a été réalisée par Kahneman et Beatty en 1966. Ces auteurs ont enregistré le diamètre de la pupille lors de la réalisation d'une tâche de mémorisation de chiffres. Les résultats ont montré que plus le nombre de chiffres augmentait au plus le diamètre pupillaire augmentait. Ainsi, le diamètre pupillaire permettrait d'indiquer les demandes cognitives de la tâche. Il s'avère cependant que le diamètre de la pupille augmente jusqu'à un certain point puis revient à un niveau de base, notamment lorsque les capacités cognitives de la personne sont dépassées. Johnson et al. (2014) ont ainsi montré que lorsqu'il s'agissait de mémoriser plus de 6 chiffres, le diamètre pupillaire des enfants diminuait, ce qui était le signe d'un désengagement.

Il s'avère également que la dilatation pupillaire est sensible aux demandes attentionnelles de la tâche. Lisi et al. (2015) ont étudié l'influence des processus attentionnels de haut niveau (*top-down*) sur la dilatation pupillaire en maintenant constants les processus de bas niveau (*bottom-up*). Plus précisément, les auteurs ont fait varier le niveau de difficulté des consignes de la tâche tout en maintenant constant le nombre de stimuli. Les résultats montrent que la dilatation pupillaire varie en fonction des demandes attentionnelles amenées par les consignes de la tâche, ce qui montre que cette mesure est sensible aux processus de haut niveau. Les processus attentionnels de bas niveau ont également fait l'objet de plusieurs expériences. Porter et al. (2007) ont ainsi étudié l'influence de la difficulté d'une tâche de recherche visuelle sur la dilatation pupillaire. La difficulté de la tâche a été manipulée en faisant varier le nombre de distracteurs ainsi que leur hétérogénéité par rapport à la cible. Les résultats ont montré que la dilatation pupillaire augmentait avec la difficulté de la tâche, ce qui montre que cette mesure est également sensible aux processus de bas niveau.

La dilatation pupillaire peut aussi être utilisée comme indicateur des demandes cognitives relatives au processus d'inhibition. Ainsi, Laeng et al. (2011) ont utilisé une tâche de Stroop où il s'agissait pour les participants soit de lire des mots de couleur écrits dans cette même couleur, soit dans une couleur différente, soit de lire des mots ne représentant pas une couleur (Stroop, 1935). Les résultats montrent que la dilatation pupillaire est plus importante dans la condition où la couleur est non congruente avec le mot que dans la condition congruente. Ces résultats

indiquent que la dilatation pupillaire est sensible aux demandes cognitives liées au processus d'inhibition.

6.4. La charge cognitive appliquée aux déplacements

Étant donné que la théorie de la charge cognitive s'inscrit majoritairement dans le domaine de l'éducation, on recense peu de travaux où ce concept est appliqué aux déplacements. Néanmoins, certains angles de recherche se sont dessinés ces dernières années.

Un premier axe de recherche s'est intéressé à la charge cognitive éprouvée par les participants lors de la navigation à l'aide de cartes. Kiefer et al. (2016) ont été les premiers à investir le diamètre de la pupille durant une tâche de lecture de carte. Dans cette expérience, les auteurs recueillent le diamètre de la pupille de 37 participants grâce à des lunettes embarquées afin de mesurer la charge cognitive intrinsèque. Les participants réalisent 6 tâches de lecture de cartes déclinées sur 36 essais. Les résultats montrent qu'une tâche d'exploration libre est associée à une charge cognitive faible tandis qu'une tâche de planification de routes et de recherche ciblée est associée à une charge cognitive élevée. Les tâches de recherche, de comparaison de polygones et de suivi de ligne représentent quant à elles des niveaux de charge moyens. De surcroît, même s'il ne s'agit pas du sujet de la recherche, les auteurs relèvent un effet du design des cartes sur le niveau de charge cognitive. Les auteurs interprètent l'augmentation du niveau de charge cognitive en lien avec l'interactivité entre les éléments requis par les tâches. En effet, si l'exploration libre ne nécessite pas de garder en mémoire des éléments, la tâche de planification de routes quant à elle nécessite de prendre en compte de nombreux éléments ainsi que les mettre en relation pour réussir la tâche.

Fang et al. (2020) ont également étudié la charge cognitive associée aux informations présentes sur les cartes de navigation en intérieur. De manière plus précise, les auteurs se sont intéressés à l'influence des points de repère et de la surbrillance des chemins sur les performances ainsi que le niveau de charge cognitive et si celles-ci variaient en fonction du sexe. Pour ce faire, les auteurs ont évalué les participants lors d'une tâche de reconnaissance de routes dans quatre conditions : (1) points de repère clefs uniquement, (2) quantité élevée de points de repère, (3) chemins en surbrillance, (4) absence de chemins en surbrillance. Au total, 80 participants ont été répartis dans chacune des quatre conditions. Le niveau de charge cognitive dans cette expérience a été mesuré à l'aide de l'échelle de Cooper-Harper, qui est une évaluation subjective du niveau de charge par les participants. Les résultats montrent que si les participants mettent moins de temps à réaliser la tâche lorsque les repères clefs sont présents, il n'y a pas de

différence de niveau charge cognitive entre la condition repères clefs et repères en grande quantité. Néanmoins, les participants ont de meilleures performances ainsi qu'un niveau de charge cognitive plus faible dans la condition impliquant le chemin en surbrillance. Les auteurs constatent aussi l'effet du sexe sur l'influence de la présentation des repères et des chemins sur le niveau de charge cognitive. La présentation des repères influe sur le niveau de charge cognitive des femmes, tandis que pour les hommes c'est la surbrillance du chemin qui influe sur le niveau de charge cognitive. Les auteurs expliquent cette différence par le type d'information utilisé en fonction du genre, les hommes ayant plus recours aux relations spatiales et les femmes aux points de repère. Ces résultats montrent ainsi l'influence des informations présentes sur une carte sur le niveau de charge cognitive ressenti par les participants.

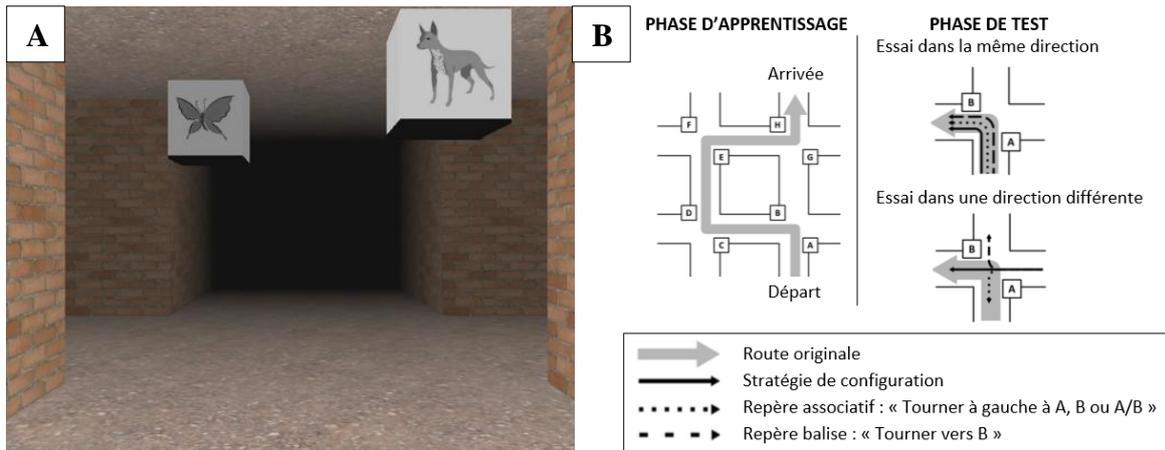
Une autre équipe de chercheurs a quant à elle investi l'étude de la charge cognitive lors des déplacements des voyageurs novices et experts en train à travers deux études. Armougum et al. (2020) ont ainsi invité 32 participants à effectuer une tâche de déplacement dans une gare parisienne où ils ont été amenés à trouver une destination en passant par des points intermédiaires. Les participants ont été séparés en deux groupes (experts et novices) en fonction de leur fréquentation de la ligne de train et de la gare utilisée pour l'expérience. Trois mesures de la charge cognitives ont été utilisées : les mouvements oculaires (fixation, saccades et diamètre de la pupille), l'activité électrodermale ainsi que la « *NASA-Task Load Index* ». Les résultats obtenus montrent que les personnes expertes éprouvent une charge cognitive plus faible lors du déplacement, ce qui est indiqué par les trois mesures. Au niveau oculaire, les participants novices ont un temps de fixation ainsi qu'une amplitude des saccades plus élevée que les experts. De même, les personnes novices ont un diamètre de la pupille plus élevé que les personnes expertes. Cette étude permet d'apprécier l'incidence du niveau d'expertise en déplacements sur le niveau de charge cognitive. Cette équipe de recherche a également mesuré des résultats similaires à l'aide de la réalité virtuelle (Armougum et al., 2019).

Mueller et al. (2008) ont investigué grâce à la pupillométrie les différences entre hommes et femmes concernant l'implication des ressources cognitives lors d'une tâche de déplacement. Ces chercheurs ont étudié les capacités de déplacement à l'aide d'une tâche virtuelle de labyrinthe de Morris (*Water Maze Task*). Lors de cette tâche, les participants ont été amenés à retrouver une plateforme visible ou invisible dans une piscine virtuelle en partant de différentes positions. Les résultats ne révèlent pas de différences entre hommes et femmes concernant la taille de la pupille. Néanmoins, sans distinction de sexe, les résultats montrent que la taille de la pupille varie en fonction de la difficulté de la tâche. En effet, le diamètre de la pupille est

supérieur lorsque la plateforme est invisible en comparaison avec la condition où la plateforme est visible. De même, le diamètre de la pupille diminue au fur et à mesure des essais, ce qui témoigne d'un effet de l'apprentissage.

Enfin, certains travaux ont étudié la charge cognitive engendrée par les stratégies de déplacement. Ainsi, de Condappa et Wiener (2016) ont investigué grâce aux mouvements oculaires les processus cognitifs impliqués dans la mise en place et le changement de stratégie. Cette expérience se déroule dans un EV composé de 4 intersections où 2 points de repère sont positionnés en diagonale (voir Figure 7a). La position des repères est conçue pour qu'ils puissent être utilisés pour trois types de stratégie : une basée sur les repères balises, une sur les repères associatifs et une sur l'apprentissage de configuration (voir Figure 7b). Lors de cette expérience, les participants observent le chemin deux fois consécutives puis sont exposés à des photos d'intersections où ils doivent indiquer le chemin correct. Les photos d'intersections varient en fonction de l'angle d'arrivée (90° , 180° ou 0°) par rapport au parcours d'apprentissage. Ainsi un angle d'arrivée modifié de 0° correspond au même angle de vue que celui du parcours d'apprentissage. Cette procédure est répétée à travers 5 blocs d'essais. Les réponses de directions données par les participants sont utilisées comme indicateurs de la stratégie utilisée. Les résultats obtenus par les chercheurs montrent dans un premier temps une diminution de la taille de la pupille au fur et à mesure des essais, ce qui témoigne d'un effet de l'apprentissage. Conjointement, les chercheurs observent une augmentation de la dilatation de la pupille en lien avec la mise en place d'une stratégie de configuration plutôt qu'une stratégie reposant sur les repères balises. Enfin, le diamètre de la pupille est plus élevé lorsque l'angle d'arrivée est différent de l'angle d'apprentissage que lorsqu'ils sont identiques, ce qui témoigne du coût cognitif engendré par le changement de perspective. Ces travaux sont à notre connaissance, les seuls étudiant la charge cognitive associée aux différents points de repère dans un contexte de navigation en EV. Par conséquent, les études réalisées dans ce travail de thèse se sont fortement inspirées du design graphique et expérimental utilisé par ces auteurs.

Figure 7. Aperçu de l'environnement virtuel utilisé par de Condappa et Wiener (2016)



Les études menées sur la charge cognitive dans le contexte des déplacements montrent ainsi que le type de tâche (exploration libre ou planification de chemins), le type d'information présente, le type de stratégie de navigation employée et l'apprentissage influent sur le niveau de charge cognitive. De même, ces études ont montré que la charge cognitive varie en fonction du sexe des individus, notamment en lien avec le type d'informations qu'ils utilisent pour se déplacer (repères ou relations spatiales). Par conséquent, la mesure de la charge cognitive semble être un indicateur important pour identifier ce qu'engendrent cognitivement les différents types de tâches, d'informations et de stratégies relatives à la navigation spatiale. Elle permet aussi de mesurer si ces éléments engendrent le même effort cognitif entre les individus.

CHAPITRE 2 :

**L'UTILISATION DE L'OCULOMÉTRIE POUR L'ÉTUDE DES
CAPACITÉS DE DÉPLACEMENT DES PERSONNES
PRÉSENTANT UNE DÉFICIENCE INTELLECTUELLE**

Comme énoncé en introduction, les personnes avec une déficience intellectuelle effectuent peu de déplacements au quotidien, ce qui peut s'expliquer par des causes multiples. Les travaux de cette thèse ont pour objectif de mieux appréhender ces difficultés grâce à l'analyse des mouvements oculaires. Cette approche méthodologique implique la connaissance des processus attentionnels des personnes présentant une DI ainsi que des travaux ayant eu recours à cette méthodologie. Ainsi, après avoir défini la déficience intellectuelle, nous aborderons ces deux axes avant de présenter en détail les capacités de déplacement des personnes avec une DI et les systèmes d'aide à la navigation existants.

1. Déficience intellectuelle : définition et étiologie

La déficience intellectuelle (DI) est caractérisée par un déficit cognitif ainsi qu'un déficit du comportement adaptatif. Le DSM-V (American Psychiatric Association, 2013) propose 3 critères relatifs au diagnostic : (A) la présence d'un « déficit dans les fonctions intellectuelles comme le raisonnement, la résolution de problèmes, la planification, l'abstraction, le jugement, l'apprentissage scolaire et l'apprentissage par l'expérience, confirmés par l'évaluation clinique et les tests d'intelligence individuels standardisés », (B) un « déficit des fonctions adaptatives qui se traduit par un échec dans l'accession aux normes habituelles de développement socioculturel permettant l'autonomie et la responsabilité sociale. Sans assistance au long cours, les déficits adaptatifs limitent le fonctionnement dans un ou plusieurs champs d'activité de la vie quotidienne comme la communication, la participation sociale, l'indépendance, dans des environnements variés tels que la maison, l'école, le travail, la collectivité » et (C) un « début du déficit intellectuel et adaptatif pendant la période du développement ».

La prévalence de la DI est estimée à 1 % de la population générale (American Psychiatric Association, 2013). De manière plus précise, on estime en France la prévalence de DI légère à 10 et 20 pour 1 000 et un taux de 3 à 4 pour 1 000 concernant la DI sévère (INSERM, 2016).

La DI peut être liée à une cause génétique (Trisomie 21, syndrome de Williams, syndrome de l'X fragile, etc.), à l'environnement, mais également être idiopathique ce qui représente la majorité des situations.

2. Les processus d'attention visuelle des personnes présentant une DI

Michael Carlin et son équipe ont réalisé une série d'études portant sur l'attention visuelle sélective auprès des personnes présentant une DI. L'attention sélective réfère à la « capacité à orienter sélectivement l'attention sur des informations jugées pertinentes (au regard de la tâche en cours) plutôt que sur des informations jugées non pertinentes » (Maquestiaux, 2017, p.17).

Carlin et collaborateurs (1995) ont étudié à travers une tâche de recherche visuelle le temps de détection de cibles auprès d'adultes présentant une DI légère âgés en moyenne de 28 ans en comparaison avec des adultes sans DI âgés de 20 ans. Ces chercheurs se sont inspirés des méthodologies utilisées par Treisman et Gormican (1988) pour étudier les phénomènes de pré-attention et attention dans une tâche de recherche visuelle. La tâche de recherche visuelle s'est déroulée avec un ordinateur. Les participants devaient indiquer si une cible visuelle était présente ou absente. Les auteurs ont fait varier la cible, la dimension (couleur, forme, taille et orientation) ainsi que le nombre de distracteurs. Les résultats obtenus montrent que les personnes avec une DI mettent 2 fois plus de temps à répondre en moyenne, ce qui s'explique par une vitesse de traitement de l'information plus lente (Kail, 1992). Par ailleurs, le temps de détection de cible ne varie pas en fonction du nombre de distracteurs uniquement lorsqu'il s'agit de la couleur. Les personnes avec une DI parviennent donc à mettre en place un processus de recherche parallèle (traitement de plusieurs stimuli en simultané) pour les dimensions impliquant la couleur. Inversement, le temps de détection des stimuli varie en fonction du nombre pour les propriétés de forme (exemple : trouver un triangle parmi des cercles) ou de taille. Ces résultats sont le signe de l'utilisation d'un processus de recherche séquentiel de la cible et suggèrent une perception moins efficiente (par des processus *bottom-up*) des informations de taille et de forme dans cette population.

Carlin et al. (2002) ont réalisé par la suite une étude dans le but d'évaluer l'efficacité des processus *top-down* et *bottom-up* chez les personnes présentant une DI. Comme dans la précédente expérience, les participants ont réalisé des tâches de recherche visuelle dans laquelle une cible visuelle était présentée sur un écran parmi des distracteurs. La cible différait des distracteurs d'après un critère de forme (un rectangle entre des ronds), de couleur ou de taille. Le nombre de distracteurs et la position de la cible variaient au fil des essais. Les participants réalisaient la tâche de manière guidée et non guidée. Lors de la tâche non guidée, les distracteurs différaient de la cible uniquement d'après un critère de taille ou de forme. Lors de la tâche guidée, les distracteurs différaient de la cible d'après un critère de dimension (taille ou forme)

et de couleur. La présence de ces deux critères permet au participant de limiter la recherche à un nombre plus faible d'éléments s'il réduit la recherche sur un critère de couleur (« trouver le carré bleu »). Les résultats montrent que la recherche visuelle est plus rapide lorsque la tâche est guidée. Cette recherche montre la capacité des personnes avec une DI à concentrer leur attention sur les stimuli pertinents pour la tâche en mettant en place des processus de recherche visuelle *top-down*.

Les processus d'attention sélective ont également été étudiés par Merrill et O'Dekirk (1994) à l'aide d'une tâche de recherche visuelle auprès de personnes avec une DI sans étiologie spécifique, de personnes présentant une trisomie 21 et de personnes au développement typique. Lors de cette tâche les participants devaient identifier un stimulus cible (un chiffre ou une lettre) dans plusieurs conditions : (1) les distracteurs étaient identiques à la cible (non différenciés de la cible), (2) les distracteurs appartenaient à la même catégorie que la cible (lettre ou chiffre), (3) les distracteurs appartenaient à une autre catégorie. Les expérimentateurs faisaient également varier la distance entre la localisation de la cible et les distracteurs. Les résultats montrent que le temps de réponse est davantage impacté par la distance entre la cible et les distracteurs chez les personnes avec une DI. Les personnes au développement typique répondent moins rapidement lorsqu'il y a moins de 5 espaces (1,23 degré d'angle) entre les distracteurs et la cible, tandis que les personnes avec une DI répondent plus lentement lorsqu'il y a moins de 10 espaces (2,43 degrés d'angle). Ce résultat montre une difficulté à restreindre le focus attentionnel. De même, leurs performances sont moins sensibles aux catégories de distracteurs, ce qui indiquerait une difficulté à mettre en place un processus *top-down* basé sur cette information.

Pour résumer, les recherches menées sur l'attention visuelle des personnes avec une DI suggèrent qu'il existe un déficit des processus *bottom-up*, notamment lorsqu'ils impliquent la forme et la taille. En ce qui concerne les processus *top-down*, les résultats des recherches suggèrent qu'ils sont possibles, mais qu'ils ne seraient pas mobilisés spontanément. Il est possible de transposer ces recherches à la problématique de sélection des points de repère. Les déficits des processus *bottom-up*, laissent à penser que les personnes avec une DI sélectionneraient les repères d'après des paramètres de saillance perceptive différents des personnes au développement typique. Il serait ainsi possible qu'ils sélectionnent les repères les plus colorés, mais que la taille des repères n'influe pas sur leurs choix.

3. L'oculométrie auprès des personnes présentant une DI

3.1. L'utilisation du matériel d'oculométrie auprès des personnes avec une DI

Le recours à l'oculométrie auprès des personnes présentant une DI soulève certaines difficultés méthodologiques propres aux particularités de cette population (Csákvári & Gyori, 2015).

Dans un premier temps, il s'avère que les personnes présentant une DI sont davantage sujettes à des troubles oculaires que les personnes au développement typique. Van Splunder et al. (2006, 2004) constatent une forte prévalence des troubles oculaires en comparaison avec la population générale notamment vis-à-vis du strabisme, du trouble de la réfraction et de la basse vision. La présence des troubles est influencée par l'âge, la sévérité de la DI, mais également par l'étiologie (Owens et al., 2006). Van Splunder et al. rapportent que la prévalence des troubles chez des personnes avec une DI légère sans étiologie est de 2,2% contre 28,8% chez les personnes avec une déficience profonde. Dans le cas des personnes avec une trisomie 21 âgées de plus de 50 ans, la prévalence passe à 66,7%. De surcroît, l'étiologie semble jouer également sur le type de trouble visuel. Van Splunder et al. (2004) comparent le type de troubles visuels entre la population générale, les personnes présentant une DI et les personnes présentant une trisomie 21. Ils observent une forte prévalence de kératocône, strabisme et myopies chez les personnes DI et constatent plus d'erreurs réfractives chez les personnes avec une trisomie 21. La présence plus élevée de troubles oculaires chez les personnes avec une DI serait liée principalement à des lésions cérébrales durant la période pré ou périnatale ou à des troubles se prononçant lors du développement de l'enfant (Boot et al., 2012; Kwok et al., 1996; Sandfeld Nielsen et al., 2007).

Outre l'aspect strictement oculaire, l'utilisation de l'oculométrie nécessite également que la personne reste immobile durant le recueil des données. Cependant, les personnes présentant une DI sont plus sujettes à présenter des stéréotypies qui peuvent diminuer la sensibilité du matériel (Chebli et al., 2016). De plus, la capacité à rester immobile durant une longue période requiert de bonnes capacités d'inhibition, ce qui est une dimension souvent déficitaire chez les personnes présentant une DI (Bexkens et al., 2014). Utiliser des lunettes d'oculométrie peut pallier ce problème dans le cas de certaines études (Earl et al., 2019).

3.2. Les mouvements oculaires des personnes présentant une DI

3.2.1. Les fixations

Les recherches ayant étudié les mouvements oculaires auprès des personnes présentant une DI montrent des différences au niveau des fixations oculaires. Nikishina et al. (2021) ont mesuré les mouvements des yeux réalisés lors d'une tâche d'observation de stimuli visuels et textuels auprès d'enfants âgés de 7 à 9 ans au développement typique et d'enfants présentant une DI légère. Les résultats montrent que les enfants avec une DI orientent davantage leur attention sur le centre de la scène visuelle en comparaison avec les zones périphériques lorsqu'ils observent une image contenant plus de 6 objets (12 objets). Néanmoins, lorsque l'image contient peu d'objets (6 objets), ils répartissent plus uniformément leur regard entre le centre de la scène et les zones périphériques. Les enfants au développement typique répartissent quant à eux leurs fixations de manière équivalente entre le centre de la scène et les zones périphériques lorsqu'une image contient 6 objets ou plus. Les enfants avec une DI ont également tendance à davantage fixer les informations visuelles en comparaison avec les informations textuelles. Enfin, de manière globale, les enfants avec une DI réalisent un nombre plus faible de fixations qui sont aussi d'une durée plus courte que les enfants sans DI. Ces résultats vont dans le sens de ceux observés par Carlin et al. (2003) en ce qui concerne l'observation du centre de la scène visuelle. Ces auteurs ont étudié les mouvements oculaires des personnes avec et sans DI dans le cadre d'une tâche de recherche visuelle en environnement écologique. Les résultats montrent une meilleure performance des participants présentant une DI lorsque le changement implique la couleur plutôt que la taille et la forme. Ce résultat allant dans le sens de leurs précédentes études (Carlin et al., 1995). Ils constatent également que les personnes avec une DI regardent davantage le centre de la scène visuelle et ont un laps de temps plus long pour orienter leur regard en zone périphérique.

Boot et al. (2012) ont étudié quant à eux la réponse d'orientation visuelle à l'apparition d'un nouveau stimulus afin de tester le fonctionnement de l'ensemble des voies de traitement visuel ainsi que le système oculomoteur. Pour ce faire, les auteurs ont mesuré lors d'une tâche de préférence visuelle (Fantz, 1965), le temps d'apparition de la première réponse d'orientation volontaire face à la présentation d'un stimulus auprès de 127 enfants présentant une DI âgés de 2 à 14 ans comparés à des enfants au développement typique appariés sur l'âge chronologique. Trois types de stimuli étaient présentés : un cartoon, des stimuli de formes et des stimuli de mouvements. Les résultats montrent un temps de réaction de fixation plus long chez les enfants avec une DI pour les trois types de stimuli en comparaison avec les enfants au développement

typique. Les performances à une tâche d'orientation visuelle permettent d'estimer le niveau de fonctionnement du traitement visuel, ainsi les temps de réaction de fixations plus longs des enfants avec une DI suggèrent un risque élevé de dysfonctionnement du traitement visuel. Au sein du groupe DI, les enfants ont un temps de réaction de fixation plus élevée dans la condition présentant un cartoon en comparaison avec les deux autres conditions. Ce résultat est surprenant, car il s'agit des stimuli les plus contrastés et colorés, ce qui laissait supposer qu'ils attireraient l'attention visuelle de manière plus rapide. Les auteurs expliquent ce résultat par une possible altération des processus neuronaux impliqués dans la formation d'une carte de saillance.

3.2.2. Les saccades

Takahashi et al. (1987) cités par Haishi et al. (2011) ont étudié le temps de latence des saccades auprès des adolescents avec une DI en comparaison avec des adolescents au développement typique lors d'une tâche de suivi de cibles. Les résultats montrent que les adolescents avec une DI ont un temps de latence des saccades plus long que les adolescents typiques. Des résultats allant dans ce sens ont également été mesurés par Haishi et al. (2011) auprès de 44 adolescents et adultes présentant une DI sévère à légère. Les résultats montrent que la latence des saccades est corrélée négativement au quotient intellectuel. Ainsi, au plus le quotient intellectuel est bas, au plus les participants émettent un temps de latence des saccades élevé.

3.2.3. Le diamètre de la pupille

La dilatation pupillaire a été mesurée dans peu d'études auprès des personnes présentant une DI. Angulo-Chavira et al. (2017) ont mesuré les différences de dilatation pupillaire lors d'une tâche de détection de cible auprès de personnes présentant une trisomie 21 comparées à des personnes au développement typique appariées sur l'âge mental. Les résultats montrent que les personnes avec une trisomie 21 ont de moins bonnes performances et montrent une dilatation pupillaire plus élevée que les personnes au développement typique. D'après les auteurs, ces résultats seraient le signe d'un effort cognitif plus élevé de la part des personnes avec une trisomie 21, ces résultats étant corroborés par une augmentation de la dilatation pupillaire avec la difficulté de la tâche dans les deux groupes.

La dilatation pupillaire a également été étudiée dans un contexte de perception de scène d'interaction sociale auprès des personnes présentant un syndrome d'Angelman (Hong et al., 2017). Ce syndrome rare engendre une DI sévère associée à des troubles de la communication, des troubles moteurs et de l'équilibre, des crises d'épilepsie, des troubles du sommeil et des

comportements distinctifs (rires fréquents, excitabilités, etc.) (Richard, 2018). Les résultats montrent que les personnes présentant ce syndrome émettent une dilatation pupillaire plus faible que les participants typiques lors de la perception de scènes d'interaction sociale. Ces résultats ouvrent la voie à une possible utilisation de la dilatation pupillaire comme indicateur de l'intérêt porté aux stimuli sociaux dans ce syndrome. La dilatation pupillaire a également été étudiée auprès des personnes présentant un syndrome 22q13 lors de la perception de visages et d'objets (Ponson et al., 2018). Les résultats ne mettent pas en évidence une différence de la dilatation pupillaire par rapport à la norme attendue pour l'âge lors de la perception des visages dans ce syndrome. Néanmoins, les auteurs relèvent une dilatation plus importante que la norme lorsque les participants observent des objets, ce qui montre un comportement spécifique à ce syndrome. Enfin, l'observation d'images émotionnelles à contenu social ou non sociale a également été étudiée auprès des personnes présentant un syndrome de Williams (Plesa Skwerer et al., 2011). Pour ce faire les participants ont été appariés à des personnes au développement typique sur un critère d'âge mental et d'âge chronologique. Les résultats montrent que les personnes avec un syndrome de Williams ont une dilatation pupillaire moins importante lors de l'observation d'images sociales associées à des stimuli négatifs. Ces résultats suggèrent que les personnes avec ce syndrome sont moins impactées par les émotions négatives que les personnes au développement typique.

En conclusion, malgré les difficultés relevées concernant le recueil des données, l'oculométrie a permis d'explorer de nombreux indicateurs pour mieux comprendre certaines difficultés cognitives ou sociales rencontrées par les personnes présentant une DI. De même, l'analyse de la pupille s'avère également être un bon indicateur de la charge cognitive auprès des personnes avec une trisomie 21.

4. Les capacités de déplacement des personnes présentant une DI

4.1. Les difficultés de déplacement

Avant d'aborder les dimensions cognitives impliquées dans les capacités de déplacement, il est important de connaître l'état des lieux concernant la fréquence des déplacements au quotidien. Dans une étude réalisée en Établissement et Service d'Aide par le Travail, Mengue-Topio et Courbois (2011) ont interrogé 70 travailleurs par le biais d'entretiens semi-directifs. Les résultats soulevés rapportent que 54,3 % des personnes ne se déplacent jamais ou rarement dans leur quartier d'habitation, le pourcentage passant à 71,4% en ce qui concerne les déplacements

hors du quartier. La principale raison évoquée par ces personnes concerne la crainte personnelle ou des proches (notamment la peur de se perdre ou la sécurité), ce qui fait de l'amélioration des capacités d'orientation un axe de recherche important pour remédier aux difficultés rencontrées.

Les premiers travaux de recherche sur les capacités de déplacement des personnes présentant une DI ont émergé dans les années 1980 aux États-Unis. Dans un contexte de désinstitutionnalisation où les personnes ont été réorientées vers des logements privés, Golledge et al. (1983) ont étudié quelles étaient les capacités de déplacement de ces personnes en milieu urbain. Les auteurs ont réalisé une étude auprès de 16 personnes avec une DI habitant depuis 6 à 24 mois dans leur quartier d'habitation et étant en capacité de s'y déplacer. Les participants ont été amenés à nommer des photos de lieux de leur quartier, les positionner sur une carte, puis identifier les points de repère d'un itinéraire connu, les positionner dans l'ordre du trajet, et enfin guider l'expérimentateur vers des lieux connus plus ou moins distants. Les résultats montrent que les personnes présentant une DI ont une bonne connaissance des lieux (repères), savent restituer des routes, mais ne parviennent pas à accéder à des représentations de type carte cognitive. Peu de travaux ont par la suite investi la problématique du déplacement des personnes présentant une DI.

4.2. La sélection des points de repère

Plusieurs années après l'étude réalisée par Golledge, cette problématique de recherche a été réinvestie par le biais du modèle de Siegel et White (1975). Courbois et al. (2012) ont investigué le premier niveau de connaissance que sont les points de repère, notamment quant à la capacité à sélectionner un repère pertinent pour le déplacement. En effet, si Golledge et al. (1983) trouvent une bonne mémorisation des repères, il est important d'identifier si les personnes avec une DI sélectionnent les repères les mieux adaptés aux déplacements. Pour ce faire, Courbois et al. (2012) ont réalisé une étude en condition réelle se déroulant dans la ville de Roubaix auprès d'adolescents présentant une DI comparés à des adolescents typiques. Les participants ont été guidés par un accompagnateur sur un trajet non connu tout en étant invités à porter attention à l'environnement. Les personnes ont ensuite refait le chemin en désignant les repères qu'elles utilisent pour s'orienter. Les repères ont par la suite été catégorisés selon leur nature et localisation : repères uniques, non uniques, situés aux intersections, distants et permanents (en opposition à temporaires). Les premières observations révèlent que les personnes avec une DI font plus d'erreurs de déplacement et sont plus hésitantes lorsqu'elles doivent prendre des décisions aux intersections. Concernant les points de repère, les adolescents sans DI sélectionnent un nombre plus important de points de repère. De plus,

les résultats montrent que si les personnes avec une DI sélectionnent un nombre similaire de points de repère aux intersections que les personnes sans DI, ce qui indique une stratégie efficace, elles sélectionnent davantage de repères non uniques ou non permanents (objets mobiles). De même, bien qu'ils soient lecteurs, les participants avec une DI ont moins recours aux informations écrites pour s'orienter dans leurs déplacements. Cette étude permet de placer la difficulté de sélection des points de repère chez les personnes avec une DI comme une première piste explicative des difficultés de déplacement rencontrées.

La sélection des points de repère a été également observée en environnements virtuels par le biais de la mémorisation et des fixations oculaires. Farran, Courbois, Van Herwegen et Blades (2012) ont réalisé une étude auprès de 19 personnes présentant un syndrome de Williams ainsi que 40 enfants âgés de 6 à 9 ans. Lors de cette étude, les points de repère pouvaient être positionnés le long du chemin ou aux intersections. Les résultats montrent que les personnes avec un syndrome de Williams rappellent davantage les repères positionnés aux intersections que le long du chemin, ce qui va dans le sens des résultats observés par Courbois et al. (2012) dans un environnement réel. Ainsi, comme les personnes au développement typique, les personnes avec une DI sélectionnent préférentiellement les points de repère aux intersections. Concernant les difficultés de sélection, Farran et al. (2016) ont également mis en évidence grâce à l'oculométrie et les EV une sélection atypique des points de repère. Lors de cette étude, les participants ont été invités à mémoriser des itinéraires dans deux labyrinthes en brique rouge. Dans chaque labyrinthe étaient positionnés des repères aux intersections, le long du chemin et distants. 16 personnes présentant un syndrome de Williams ainsi que 32 enfants âgés de 6 à 10 ans ont participé à cette étude. Les résultats montrent que les personnes avec un syndrome de Williams passent un temps plus élevé à observer les zones sans points de repère que les autres groupes. De même, ils n'observent pas préférentiellement les repères uniques, ce qui rejoint les observations de Courbois et al. (2012). Enfin, les personnes avec un syndrome de Williams observent moins longtemps les repères distants dans l'environnement, ce qui pourrait avoir une incidence dans une tâche d'apprentissage de la configuration.

Conjointement, la mémorisation des points de repère semble varier en fonction de l'origine syndromique de la DI. Il s'avère que les personnes avec une trisomie 21 rappellent moins de points de repère que les personnes présentant une DI liée à une étiologie indifférenciée (M. Davis et al., 2014). Cette différence pourrait s'expliquer par les faibles capacités verbales montrées par les personnes avec une trisomie 21. En effet, apprendre un repère repose en partie sur des stratégies d'apprentissage verbal et leur connaissance est également testée à l'aide d'une

tâche de rappel verbale, ce qui influe sur les performances de rappel. Ainsi, les personnes présentant une DI auraient des stratégies de sélection des points de repère atypiques qui peuvent impacter leur apprentissage des routes. Si elles semblent identifier l'importance des points de repère, notamment ceux aux intersections, elles éprouvent néanmoins des difficultés à sélectionner les points de repère par pertinence (unique/ non unique) ainsi qu'à focaliser leur attention visuelle sur ces informations.

Dans la perspective des difficultés de sélection, N'Kaoua et al. (2019) ont exploré l'efficacité de différents types d'aide à la navigation par le biais d'environnements virtuels auprès d'adultes présentant une trisomie 21. Ils comparent l'effet d'une présentation en surbrillance des points de repère (présentés en jaune fluo), d'une aide par flèche directionnelle, d'une présentation de l'intersection vu d'en haut et d'une condition sans aide sur différentes tâches. Les résultats montrent que les performances sont supérieures dans la condition où les points de repère sont en surbrillance pour la majorité des tâches (hormis celle impliquant la connaissance de la configuration). Ces éléments suggèrent que l'augmentation de la saillance perceptive d'un repère peut être un moyen efficace d'améliorer les performances de déplacement. Ainsi, ces résultats ouvrent des pistes intéressantes pour l'adaptation des systèmes d'aide à la navigation aux personnes présentant une DI.

4.3. L'apprentissage de routes

Le second niveau de connaissance énoncé par Siegel et White (1975) concerne l'apprentissage de routes. En environnements naturels, les personnes présentant une DI sont capables d'apprendre des routes, mais elles commettent plus d'erreurs de direction que les personnes sans DI (Courbois, Farran, et al., 2013; Farran et al., 2010). De manière plus précise, les études réalisées en EV ont étudié le nombre d'essais nécessaire à l'apprentissage ainsi que le nombre d'erreurs de direction. Les paradigmes expérimentaux varient en fonction du nombre d'intersections et de repères présents dans l'environnement. Les personnes avec une DI ont besoin de plus d'essais pour apprendre un itinéraire et font davantage d'erreurs de direction en comparaison avec des adultes du même âge chronologiques (Mengue-Topio et al., 2011, 2015). Néanmoins, lorsque l'appariement est effectué sur l'âge mental, des différences inter-syndromiques peuvent apparaître. Précisément, les personnes avec un syndrome de Williams ont les mêmes capacités d'apprentissage que des enfants typiques possédant le même niveau intellectuel, voire parfois de meilleures (Farran, Courbois, Van Herwegen, & Blades, 2012; Farran et al., 2015, 2016; Purser et al., 2015). A contrario, les personnes présentant une trisomie 21 ont des capacités d'apprentissage plus faibles que les enfants typiques possédant le même

niveau intellectuel (Courbois, Farran, et al., 2013; Farran et al., 2015; Purser et al., 2015). Les participants ayant une DI d'origine indifférenciée (ne comprenant pas la T21 et le SW) effectuent moins d'erreurs de directions et ont besoin de moins d'essais pour apprendre un itinéraire que les personnes présentant une trisomie 21 (M. Davis et al., 2014).

Il s'avère que les personnes avec un syndrome de Williams ont une connaissance de routes plus dépendante des points de repère que les enfants au développement typique. Broadbent et al. (2015) ont effectué une tâche d'apprentissage d'itinéraires en EV auprès d'adultes présentant un syndrome de Williams et d'enfants typiques âgés de 5, 7 et 9 ans. L'itinéraire appris par les participants était composé de 6 intersections avec 12 repères distants dans une condition et aucun point de repère dans l'autre condition. Les résultats montrent que les capacités d'apprentissage des personnes avec un syndrome de Williams sont davantage impactées négativement par l'absence des points de repère que celles des enfants au développement typique. De même, aucun participant présentant un syndrome de Williams ne parvient à mémoriser l'itinéraire lorsque les repères sont absents.

Les difficultés d'apprentissage de routes peuvent être expliquées par différentes dimensions cognitives. Dans un premier temps, plusieurs études relèvent un lien important entre les capacités non verbales à l'aide des Progressives Matrices de Raven (Raven, 1998) et le nombre d'erreurs de direction (Farran et al., 2015; Purser et al., 2015). Purser et al. (2015) mettent en avant un lien important entre les capacités d'inhibition et le nombre d'erreurs de direction chez les personnes présentant une trisomie 21 et un syndrome de Williams. De même, les auteurs relèvent un lien entre les capacités de mémoire à long terme et le nombre d'erreurs. L'absence de lien entre le nombre d'erreurs et l'âge chronologique relevé dans ces épreuves amène à supposer que l'apprentissage d'itinéraires n'est pas influencé par l'expérience. Il semblerait que les personnes atteignent rapidement un niveau maximum de compétences et qu'elles ne bénéficient pas de l'expérience liée à l'âge. Ces résultats peuvent en partie être expliqués par le faible nombre d'expériences de déplacements réalisées de l'enfance à l'âge adulte (Mengue-Topio & Courbois, 2011).

Outre les capacités de mémorisation de routes, Courbois et al. (2019) ont également investi la manière de décrire un itinéraire. À l'aide d'EV, les auteurs comparent les différents types de descriptions verbales d'itinéraires entre des adolescents présentant une DI et un groupe d'adolescents de même âge chronologique. Dans cette expérience, après avoir mémorisé un chemin, les participants sont amenés à décrire la route apprise à l'expérimentateur. Les résultats montrent que les personnes avec une DI décrivent majoritairement leur chemin avec des

indications d'actions en comparaison avec les adolescents du groupe contrôle qui décrivent l'itinéraire en faisant référence aux points de repère et aux actions. Ce résultat est surprenant, car il est supposé que l'apprentissage de route repose fortement sur les repères, mais ils sont dans ce cas presque absents des descriptions verbales. Ces résultats peuvent indiquer une possible dissociation entre les connaissances procédurales et les connaissances explicites chez les personnes avec une DI. Étant donné le lien existant entre connaissances spatiales et verbales, améliorer la capacité à dénommer les chemins pourrait être une perspective de prise en charge.

4.4. La connaissance de la configuration

La connaissance de la configuration aussi appelée carte cognitive représente l'apprentissage le plus élaboré des connaissances spatiales. Une première étude a été réalisée en condition réelle par Farran et al. (2010) auprès de personnes présentant un syndrome de Williams, de personnes avec une DI sans étiologie spécifique ainsi que des adultes du même âge chronologique. Lors de cette étude, les participants ont été guidés sur un campus durant 1 kilomètre comportant 20 intersections. Les participants ont ensuite été amenés à retracer l'itinéraire deux fois. Dans cette étude, les auteurs évaluent la connaissance de la configuration en demandant aux participants de pointer la direction des différents points de repère non visibles. Les réponses des participants ont été mesurées selon la différence angulaire entre le pointage et la position réelle du point de repère. Les résultats montrent que les personnes présentant une DI sans étiologie spécifique ainsi que les personnes avec un syndrome de Williams effectuent des erreurs angulaires plus élevées que les typiques, ce qui témoigne d'une difficulté d'accès à la connaissance de la configuration.

L'accès à l'apprentissage de configuration peut également s'évaluer par le biais d'une tâche de création de raccourcis. Ce type de tâche a été réalisé en EV par plusieurs auteurs auprès d'adultes avec une DI associée ou non à un syndrome. Mengue-Topio et al. (2015) ont testé cette habileté auprès d'adultes présentant une DI en comparaison avec des étudiants avec un critère de 10 essais pour parvenir à effectuer la tâche. Les résultats montrent que les personnes avec une DI parcourent des distances plus élevées et utilisent moins les raccourcis. Néanmoins, les auteurs observent une amélioration de la capacité à créer des raccourcis au fur et à mesure des essais, ce qui témoigne d'un effet de la familiarité sur l'apprentissage. Farran et al. (2015) ont également testé cette capacité auprès de personnes présentant un syndrome de Williams, une trisomie 21 et des enfants au développement typique âgés de 5 à 11 ans. Ils rapportent que concernant la création de raccourcis, 59% des enfants réussissent la tâche contre 10% des personnes présentant une trisomie 21 et 35% des personnes avec un syndrome de Williams. Les

personnes avec une trisomie 21 semblent donc avoir davantage de difficultés à accéder à l'apprentissage de la configuration.

Enfin, une autre manière de mesurer la connaissance de la configuration peut être de tester les référentiels spatiaux de type allocentrique. Broadbent et al. (2014) ont évalué le recours à une stratégie égocentrique et allocentrique chez les personnes présentant un syndrome de Williams ainsi que des enfants âgés de 5 à 10 ans. Lors de cette expérience, les participants ont été amenés après une phase d'apprentissage d'itinéraires à rejoindre une destination par le chemin le plus court en modifiant le point de départ. Les stratégies employées ont été testées de manière spontanée sans feedbacks puis dans un second temps le recours à une stratégie allocentrique a été encouragé à l'aide de feedbacks. Les résultats montrent que les participants avec un syndrome de Williams utilisent une stratégie mixte de manière spontanée. La stratégie mixte correspondant à l'utilisation d'une stratégie égocentrique (basée sur les mouvements du corps) au début de l'essai puis à une stratégie allocentrique (basée sur les repères). Cependant, les résultats montrent que les personnes avec un syndrome de Williams ne parviennent pas à mettre en place une stratégie allocentrique lorsqu'elles y sont encouragées. Ces résultats s'expliqueraient par une capacité à utiliser les repères pour s'orienter, mais une difficulté à se représenter les relations spatiales entre les repères et la localisation de la fin de l'itinéraire.

Ainsi, les différentes études ont montré que les personnes présentant une DI ont des difficultés dans l'acquisition des différentes connaissances spatiales. Elles parviennent à apprendre des itinéraires, mais ont besoin de plus de temps. Les études montrent que l'apprentissage d'itinéraires est facilité par la présence des points de repère. Néanmoins, les personnes éprouvent des difficultés à sélectionner des repères pertinents pour cet apprentissage. Ainsi, améliorer la sélection des repères permettrait de faciliter l'apprentissage d'itinéraires.

5. Les systèmes d'aide à la navigation destinés aux personnes présentant une

DI

Une revue de littérature réalisée par Safari et al. (2023) portant sur 13 études a mis en évidence que les systèmes d'aide à la navigation peuvent avoir un impact positif sur les déplacements autonomes des personnes avec une DI. Les auteurs soulignent cependant que les personnes présentant une DI sont rarement incluses dans la conception de ces systèmes d'aide alors qu'il s'agit d'une démarche favorisant la création de systèmes proches du besoin des personnes.

García de Marina et al. (2012) ont réalisé une étude auprès de personnes avec une trisomie 21, un syndrome de Turner et une paralysie cérébrale afin de déterminer le meilleur type d'assistance. À l'aide d'une application GPS mobile créée par l'équipe, les chercheurs ont comparé deux modes de guidances lors de la réalisation de plusieurs itinéraires : le mode audio (« tourner à droite ») et le mode visuel (photo avec une flèche directionnelle). Les résultats montrent que le mode de présentation visuel mène à un nombre d'erreurs plus faible que le mode de présentation verbal. Néanmoins, les participants ayant de bonnes capacités verbales font moins d'erreurs dans la condition avec les consignes verbales. Kelley et al. (2013) ont également étudié les effets d'une navigation basée sur des photos présentées sur un iPod auprès de 4 jeunes adultes présentant une DI. Les résultats montrent que les participants réussissent mieux à atteindre une destination puis revenir au point de départ dans cette condition plutôt que dans la condition avec une carte. Il faut souligner que les participants parviennent à réaliser les itinéraires après 2 ou 3 essais sans l'aide de l'iPod, ce qui démontre bien la mise en place d'un apprentissage.

Davies et al. (2010) ont comparé les capacités de déplacement d'un groupe utilisant un système d'aide et d'un groupe utilisant une carte papier ainsi que des horaires de bus. L'outil utilisé dans cette étude permet de personnaliser des trajets comprenant des itinéraires en bus. L'application permet d'indiquer à l'utilisateur quand demander l'arrêt de bus et permet d'insérer des points de repère à différents endroits du trajet. Les résultats de cette étude montrent que 73% des participants réussissent à réaliser le trajet inconnu à l'aide de l'application alors qu'uniquement 8% des participants du groupe contrôle y parviennent.

McMahon et al. (2015) ont confronté différentes aides à la navigation auprès de personnes présentant une DI. Dans le cadre de cette expérience, les auteurs comparent l'efficacité de trois types d'aide à la navigation lors d'un déplacement sur un campus universitaire : une carte papier, *Google Maps* sur un téléphone, et une application de navigation en réalité virtuelle. Les résultats montrent que l'ensemble des participants réussissent mieux à s'orienter avec l'application en réalité virtuelle plutôt qu'avec les deux autres conditions. De même, Smith et al. (2017) ont effectué une recherche portant sur l'efficacité d'un système d'aide à la navigation ayant recours à la réalité augmentée. Il s'agissait d'une application sur téléphone couplant *Google Maps* et les caractéristiques de la réalité augmentée. L'efficacité de ce système a été testée sur trois participants en suivant un plan expérimental alternant mesure de base et phase d'utilisation. Les résultats montrent que les trois participants parviennent à suivre les indications données par l'application et à se rendre à leur destination. Les auteurs mettent en

avant l'importance d'utiliser des smartphones plutôt que d'autres outils pour éviter la stigmatisation. Dans leur étude, Gomez et al. (2015) ont comparé également l'utilisation d'un système d'aide adapté (AssisT-OUT) à un système d'aide classique (*Google Maps*). Le système AssisT-OUT permettait ici de montrer une image à chaque intersection ainsi que donner des instructions de manière séquencée (une suite de points de décision avec des instructions). Les participants parviennent davantage à destination à l'aide de l'application adaptée. De même, les participants parviennent à rentrer eux-mêmes leurs destinations, ce qui aurait été difficile sur l'application classique.

En conclusion, les systèmes d'aide à la navigation adaptés aux personnes avec une DI permettent aux personnes de réaliser des trajets qui n'auraient pas été possibles avec une carte ou des applications classiques telles que *Google Maps*. L'ensemble des résultats suggèrent que l'utilisation de photos d'intersections, d'indications de direction visuelles et de points de repère favorise la réalisation des chemins guidés. Ainsi, lorsque les systèmes d'applications GPS sont adaptés aux capacités cognitives des personnes avec une DI, un déplacement autonome est tout à fait possible.

CHAPITRE 3 :
PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Nous avons dans le premier chapitre abordé le concept de navigation spatiale, en insistant sur l'importance des points de repère. De nombreuses études ont montré leur influence, mais également l'importance du type de repère (unique, non-unique, proximal, distant, balise et associatif) et de ses caractéristiques (saillance perceptive, cognitive et contextuelle). Une mise en lumière a été également effectuée quant aux variabilités inter-individuelles présentes dans la sélection des points de repère (âge, sexe, familiarité, etc.). Nous avons ensuite présenté les travaux utilisant l'oculométrie pour étudier la navigation spatiale en population générale ou clinique. Ces travaux montrent clairement que cette technologie peut fournir des indications fiables concernant la sélection et la mémorisation des points de repère. Ils permettent aussi d'étudier les composantes précoces de la prise de décision ainsi que l'influence des propriétés de l'environnement (géométrie et repères) sur l'analyse visuelle. Par ailleurs, quelques travaux montrent que la dilatation pupillaire peut être utilisée comme indicateur de la charge cognitive engendrée par l'apprentissage d'itinéraires et l'orientation dans l'espace.

Dans un second chapitre, nous avons abordé les capacités de déplacement des personnes présentant une déficience intellectuelle ainsi que les rares travaux analysant leurs mouvements oculaires. Si l'apprentissage d'itinéraires est possible, il est cependant moins performant que celui des personnes au développement typique (nombre d'erreurs et d'essais plus important). De plus, nous avons souligné des difficultés dans le choix des points de repère qui se traduisent par une sélection peu pertinente pour la tâche (utilisation de repères non uniques) ainsi que par une durée d'observation plus faible. On peut raisonnablement penser que ces difficultés contribuent aux problèmes de navigation spatiale rencontrés par ces personnes.

Nous en sommes venus à nous questionner sur la manière dont les personnes présentant une DI explorent visuellement l'environnement lors d'un apprentissage d'itinéraires, ce qui est l'objectif de ces travaux de thèse. Plus précisément, nous avons utilisé les environnements virtuels et l'oculométrie pour étudier l'influence du type de repère (balise *versus* associatif) et des caractéristiques visuelles (saillance perceptive) sur la sélection et les performances dans l'apprentissage. Nous nous sommes aussi intéressés à la prise de décision ainsi qu'à la charge cognitive.

Afin de répondre à ces questions, nous avons mis en place trois études expérimentales. La première étude était de nature exploratoire. Elle nous a permis de nous familiariser avec la technologie de recueil des mouvements oculaires et visait à étudier la sélection visuelle des repères balises congruents et incongruents ainsi que les composantes précoces de la prise de décision (biais de regard vers la direction empruntée). La seconde étude corrigeait les imperfections méthodologiques de la première et mesurait plus finement la sélection des repères balises et associatifs dans l'apprentissage d'itinéraires. Elle tentait aussi de déterminer le niveau de charge cognitive associé à l'apprentissage d'itinéraires en utilisant le diamètre de la pupille comme indicateur. Enfin, la dernière étude s'intéressait à l'effet de la saillance perceptive sur l'observation des repères et sur l'apprentissage. Chacune de ces études comparait un échantillon de personnes adultes avec une DI et un groupe contrôle composé lui aussi d'adultes.

CHAPITRE 4 :
LA SÉLECTION DES POINTS DE REPÈRE BALISES ET
ASSOCIATIFS DES PERSONNES PRÉSENTANT UNE
DÉFICIENCE INTELLECTUELLE : UNE ÉTUDE
EXPLORATOIRE D'UNE APPROCHE OCULOMÉTRIQUE
(ÉTUDE 1)

Cette étude a fait l'objet d'une communication affichée ainsi que d'un article présent en Annexe 5.

1. Objectif de l'étude et hypothèses de recherche

L'objectif de cette première expérience est d'étudier le processus de sélection des points de repère par le biais des mouvements oculaires lors d'une tâche d'apprentissage d'itinéraires en environnement virtuel auprès de personnes présentant une DI et de personnes au développement typique (DT). Les multiples types de points de repère influencent distinctement l'apprentissage, ainsi nous souhaitons identifier s'il existe une différence quant au type de points de repère observé entre ces deux groupes ainsi qu'en termes de durée d'observation. De même, nous souhaitons étudier les étapes de la mise en place d'une stratégie de sélection des repères au fil des essais ainsi que les processus de prise de décisions implicites.

Les études antérieures indiquent que les personnes présentant une DI ne sélectionnent pas toujours les repères les plus appropriés pour l'aide au déplacement (Courbois et al., 2012). Au niveau visuel, il a été montré que ces personnes passent également un temps supérieur à observer les zones sans points de repère lors de l'apprentissage d'itinéraires (Farran et al., 2016). Conjointement, Waller et Lippa (2007) ont distingué les repères de type balises, positionnés sur le chemin à emprunter et les repères associatifs, positionnés au centre des intersections. Ces auteurs ont mis en évidence que les repères de type balises permettaient un apprentissage plus rapide et nécessitant de mémoriser moins d'informations que les repères de type associatifs. En effet, l'apprentissage de route basé sur les repères balises s'apparente à une tâche de reconnaissance tandis qu'un apprentissage basé sur les repères associatifs implique une tâche de rappel indicé (Chan et al., 2012). Or, les personnes avec une DI démontrent des performances en reconnaissance relativement préservées en comparaison avec leurs performances lors d'une tâche de rappel (Carlin et al., 2001; Lifshitz et al., 2011). De fait, le recours aux repères de type « balise » permettrait pour ces personnes un apprentissage plus adapté à leurs capacités. Outre la sélection visuelle des repères, les travaux de Wiener et al. (2011) ainsi que Wiener, Hölscher et al. (2012) ont porté sur les mécanismes de prise de décision implicite appliqués à la navigation spatiale, notamment « l'effet du biais de regard ». Ce phénomène correspond à une orientation préférentielle des yeux en direction de la réponse choisie quelques millisecondes avant la prise de décision (Shimojo et al., 2003). Les recherches menées montrent que lors de l'apprentissage d'un itinéraire jalonné de repères balises, les participants au développement typique orientent leur regard vers la direction qu'ils vont

emprunter 760 ms environ avant d'émettre leur réponse, ce qui indique un biais de regard. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à ce mécanisme auprès des personnes avec une DI.

Afin d'étudier les différences d'observations entre les groupes, nous avons placé les participants dans une situation d'apprentissage d'itinéraire avec un EV qui comportait 12 intersections en Y. Chaque intersection comportait deux repères centraux ainsi que deux repères balises situés latéralement, dans chaque branche du Y. L'un était congruent avec la direction à emprunter, l'autre non (il se situait sur le mauvais chemin). Reprenant la procédure habituellement employée avec cette population (M. Davis et al., 2014; Purser et al., 2015), le chemin correct était montré une fois au participant avant de passer à la phase d'apprentissage. Les essais étaient répétés jusqu'à l'atteinte d'un critère d'apprentissage.

Au vu des études citées plus haut, nous nous attendons à ce que les personnes présentant une DI passent un temps supérieur à observer les zones sans points de repère en comparaison avec les participants du groupe DT. De même, au regard des difficultés de sélection rencontrées par les personnes avec une DI, nous faisons l'hypothèse qu'elles observent durant moins longtemps les repères balises, notamment les repères balises positionnés sur le chemin correct en comparaison avec les participants du groupe DT.

En ce qui concerne la stratégie mise en place, nous nous attendons à relever une observation préférentielle des objets balises chez les participants du groupe DT en comparaison avec les objets de type associatifs. Enfin, nous nous attendons à observer la mise en place d'une stratégie visuelle au fil des essais dans les deux groupes de participants conformément aux observations de Geisen et al. (2021). Ainsi, nous faisons l'hypothèse que les deux groupes de participants diminuent le temps passé à observer les repères balises positionnés sur le mauvais chemin au profit des repères balises positionnés sur le chemin correct. S'agissant du biais de regard associé au processus de décision, il n'existe pas d'étude sur cette question menée auprès de personnes avec une DI. Néanmoins, en lien avec les études relatant plus de comportements d'hésitations lors d'une prise de décision de direction chez ces personnes (Courbois et al., 2012), nous nous attendons à ce que le biais de regard soit prononcé plus tardivement et de manière moins importante que chez les participants du groupe DT.

2. Méthodologie

2.1. Participants

35 participants ont été recrutés pour participer à cette étude, parmi lesquels 5 participants n'ont pas été pris en compte en raison de difficultés de calibration du matériel. 24 participants avec une déficience intellectuelle (DI) âgés de 14 à 32 ans ont été recrutés en institut médico-éducatif et en établissement et service d'aide par le travail. Les participants ont été sélectionnés sur un diagnostic de déficience intellectuelle légère (QI compris entre 50 et 70) sans syndrome identifié et sans troubles associés. La présentation de la recherche et les formulaires de consentement ont été réalisés en langage simplifié afin de faciliter leur compréhension (voir Annexe 1b et 2b). Parallèlement, 11 participants au développement typique (DT) âgés de 22 à 31 ans ont été recrutés au sein de l'université de Lille. Les documents relatifs à la présentation de la recherche et formulaires de consentements sont présents en Annexe 1a et 2a. L'ensemble des consentements des participants à cette étude ont été recueillis après un délai de réflexion d'une semaine. Les participants présentant une DI ont passé le test des progressives Matrices Couleurs de Raven (PMCR) (Raven, 1998) afin de mesurer leurs habiletés de raisonnement (voir Tableau 1).

Tableau 1. Ages des participants et scores aux tests cognitifs

	Moyenne	Ecart-type	Etendue
Âge (années;mois)			
DT (n=11)	25;92	2;85	22;25 - 31;67
DI (n=19)	21;49	5;85	14;17 - 32;25
PMCR¹			
DT	-	-	-
DI	7,78	1,48	5,80 - 11

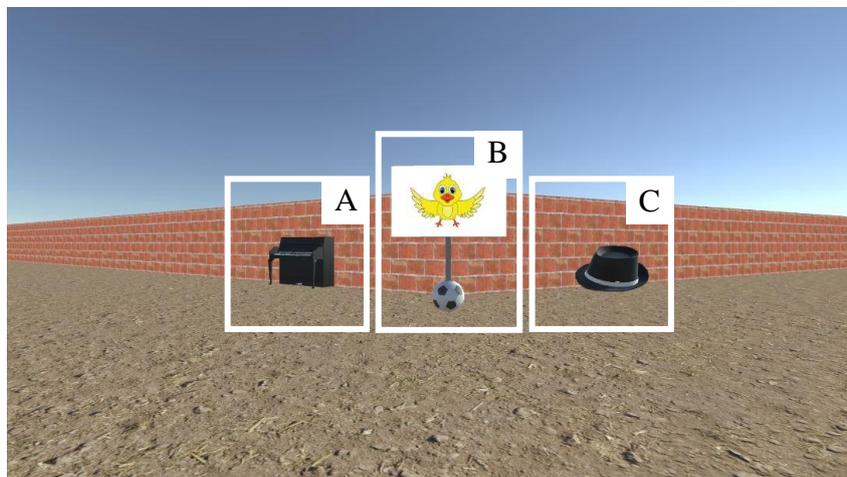
*Note.*¹Age de développement aux Progressives Matrices Colorées de Raven.

2.2. Matériel

L'environnement virtuel et la saillance visuelle

Lors de l'expérimentation, la tâche de déplacement a été présentée sur un ordinateur de la marque *Dell* d'une résolution de 1920x1080 pixels. Les participants ont été installés à une distance de 60 cm de l'écran et ont fourni leurs réponses sur le clavier de l'ordinateur à l'aide de flèches directionnelles. L'environnement virtuel utilisé a été programmé à partir du logiciel *UNITY*[®]. L'environnement utilisé est d'un type épuré visuellement avec des murs en briques rouges. Il est composé de 12 intersections en Y où figurent 4 points de repère à chacune d'elles. Parmi les 4 points de repère figurent 2 associatifs (situés au centre) et 2 balises (situés à l'entrée du chemin). Les objets balises sont catégorisés en « repères balises congruents » (présents sur le chemin à emprunter) et « repères balises non congruents » (présents sur le mauvais chemin). Les différents types de points de repère sont représentés sur la Figure 8. L'orientation des objets a été contrôlée afin qu'ils n'indiquent pas la direction à prendre (Waller & Lippa, 2007).

Figure 8. Exemple d'une intersection et des points de repère



Note. A : repère balise non congruent avec la bonne direction ; B : repères centraux ; C : repère balise congruent avec la bonne direction (tourner à droite)

Dans le but de mesurer l'influence de la saillance visuelle des repères, des cartes de saillance (*saliency map*) ont été réalisées d'après la méthode du « *Graph-based Visual Saliency* » (Harel et al., 2007) (Figure 9). Un score de saillance visuelle allant de 0 à 5 a ainsi été calculé en fonction des couleurs extraites des cartes de saillance où les zones non saillantes sont non

colorées et les zones saillantes sont indiquées en rouge (Tableau 2). Deux itinéraires différents ont été conçus et contrebalancés entre les participants pour alterner les directions droites et gauches. Enfin, étant donné que les repères centraux étaient placés au milieu de l'écran, ils attiraient davantage le regard des participants (Buswell, 1935; Tatler, 2007). Ils n'étaient cependant pas pertinents pour la mise en place d'une stratégie de type balise, ce sur quoi se sont concentrées les analyses.

Figure 9. Exemple de carte de saillance d'une intersection

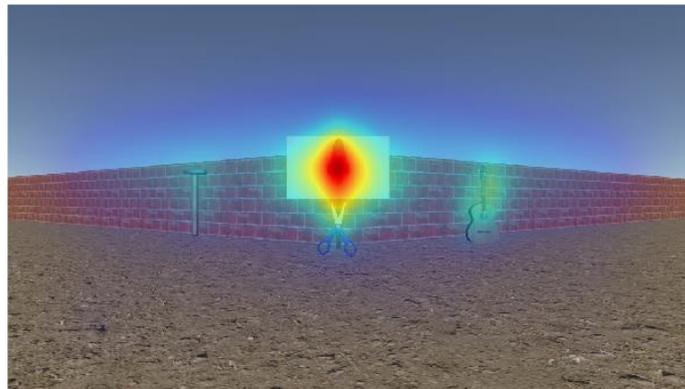
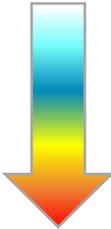


Tableau 2. Tableau de catégorisation du niveau de saillance visuelle (SV) des points de repère

Couleurs en dégradé (<i>gradient</i>) et nom	Score de saillance visuelle	
	Absence de couleur	0
	Bleu clair	1
	Bleu	2
	Jaune	3
	Orange	4
	Rouge	5

Les mouvements oculaires

Une barre oculo-motrice *SMI RED250mobile* a été utilisée sous l'écran d'ordinateur pour recueillir les données oculaires. La précision temporelle de l'appareil était de 250Hz avec une précision spatiale de 1°/arc. Le matériel a été calibré d'après une poursuite visuelle en 5 points.

Les données oculométriques ont été traitées via MATLAB (MathWorks®) et la boîte à outil *EyeMMV* (*Eye Movements Metrics & Visualisations* ; Krassanakis et al., 2014).

Validité des données oculaires

En raison des mouvements de tête et clignements des yeux, l'oculomètre n'a pas capturé les données sur l'ensemble des essais, ainsi un pourcentage de temps valide sur le temps total a été calculé pour évaluer la qualité des données. Le temps valide obtenu était de 61,62% pour les participants présentant une DI contre 86,05% pour les participants du groupe au développement typique. La différence entre les groupes était significative ($KS(11,19)=0,83$; $p<.001$), ce qui s'explique par les difficultés de calibration rencontrées avec les personnes avec une DI. Cependant, la quantité de données récoltées représentait deux tiers de l'enregistrement (dans les deux groupes), ainsi l'ensemble des données a été considéré comme traitable.

Analyses des temps de fixation en fonction des zones d'intérêt

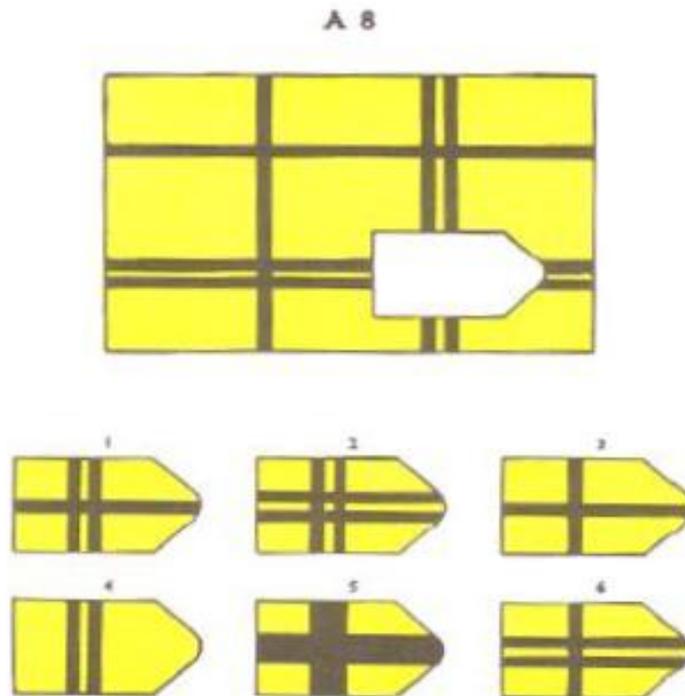
Les durées de fixation ont été traitées en fonction de quatre zones d'intérêt : les repères centraux, les repères balises congruents ou incongruents, ainsi que l'environnement (ciel, mur et sol). Pour chaque zone d'intérêt, les données ont été traduites en pourcentage de temps de fixation en fonction du temps valide. Le calcul utilisé pour chacune d'elles était le suivant : $\frac{\text{temps de fixation}}{\text{temps valide}} \times 100$. Ces données ont été relevées pour trois temps de mesure du regard : le visionnage, le premier essai et le dernier essai de la phase d'apprentissage.

Les Progressives Matrices Colorées de Raven

Afin de mesurer l'intelligence non-verbale, le test des Progressives Matrices Colorées de Raven (PMCR) a été utilisé dont un exemple de planche est présenté en Figure 10 (Raven, 1998). L'étalonnage du test a été réalisé auprès d'enfants de langue française âgés de 4 à 11 ans et demi. Cet outil est destiné aux enfants, mais également aux personnes présentant une déficience intellectuelle. Ce test est composé de 36 items répartis en 3 catégories. La première catégorie « A » est composée d'items colorés, la seconde catégorie « B » d'items en noir et blanc et la troisième catégorie « Ab » d'items additionnels. La notation des réponses est effectuée en

indiquant 1 pour une bonne réponse et 0 pour une mauvaise réponse, ce qui donne lieu à un score sur 36 points. Un score élevé à ce test indique ainsi une performance élevée.

Figure 10. Exemple d'une planche des Progressives Matrices Colorées de Raven

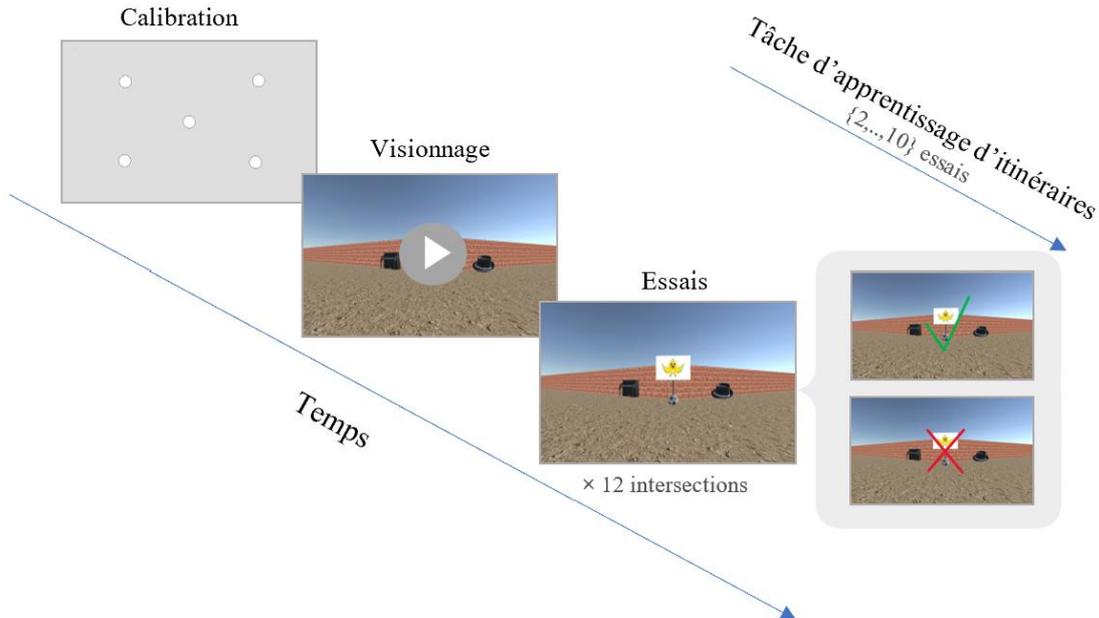


2.3. Procédure

La présentation de l'étude ainsi que le recueil des consentements ont été réalisés avant de débiter l'expérience. Chaque participant a été installé face à un ordinateur à une distance de 60 cm dans une pièce calme. Une première phase de calibration en 5 points a été réalisée ainsi qu'une explication des consignes de la tâche (voir Annexe 3). Dans un second temps, les participants ont visionné une vidéo de l'entièreté de l'itinéraire correct. À la suite de cette vidéo, les participants ont été amenés à reproduire le même itinéraire en essayant de faire le moins d'erreurs possible. La vidéo de l'itinéraire s'arrêtait à chaque intersection où les participants étaient invités à donner leur réponse grâce aux flèches directionnelles du clavier. Un feedback a été donné aux participants après chaque réponse. Dans le cas où la réponse était correcte, l'itinéraire se poursuivait. En cas d'erreur, une croix rouge apparaissait sur l'écran puis les participants pouvaient alors modifier leur réponse. Chaque participant disposait de 10 essais pour réaliser l'itinéraire sans erreurs. Afin de compléter la tâche, les participants devaient

réaliser l'itinéraire sans fautes deux fois consécutives. La procédure expérimentale est illustrée dans la Figure 11.

Figure 11. Procédure expérimentale de l'étude 1



2.4. Analyses statistiques

Afin de vérifier la normalité, un test du Shapiro-Wilk a été effectué pour l'ensemble des distributions. Dans le cas où les données respectaient le critère de normalité, des tests de t de Student pour échantillons indépendants et appariés ont été réalisés. En l'absence de normalité, un test U de Mann-Whitney a été effectué pour les comparaisons inter-groupes ainsi qu'un test de Wilcoxon pour les comparaisons intragroupes pour le temps passé à observer les points de repère entre les différents essais. Enfin, une ANOVA de Friedman a été utilisée pour évaluer l'effet de la répétition des essais sur les temps d'observation. L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé via le logiciel R (*R Core Team, 2021, 2022*) d'après le manuel réalisé par Broc et al. (2016). Certains graphiques ont quant à eux été effectués avec l'extension du logiciel R, appelée *Jamovi (The jamovi project, 2023)*.

3. Résultats

3.1. Tâche d'apprentissage d'itinéraires

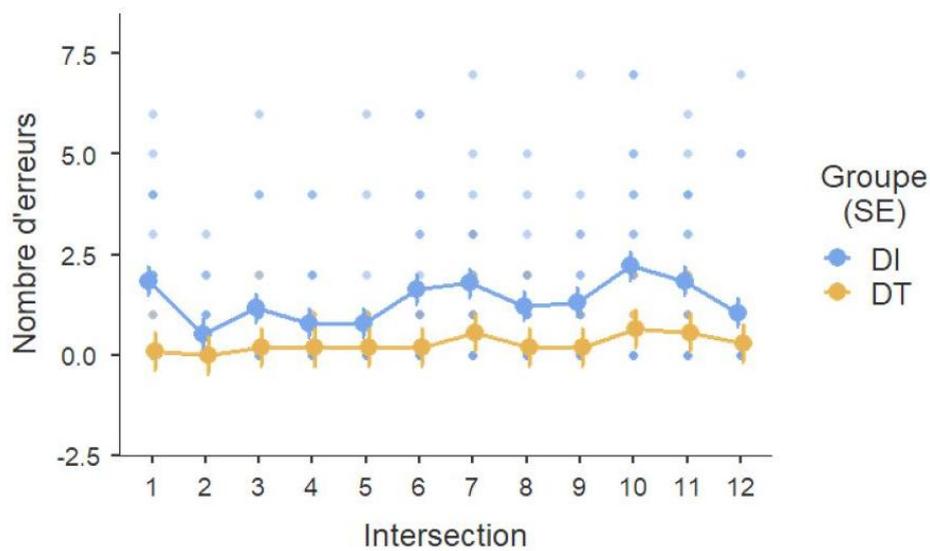
Les comparaisons inter-groupes réalisées à partir des données présentées dans le Tableau 3 montraient une différence significative concernant le nombre d'erreurs ($U(11,19)=36$; $p<.005$) et le nombre d'essais ($U(11,19)=26,5$; $p<.001$). En moyenne, les participants du groupe DT avaient un nombre d'erreurs plus faible et avaient besoin de moins d'essais pour apprendre l'itinéraire.

Tableau 3. Nombre d'erreurs et d'essais réalisés par groupe

	Moyenne	Ecart-type	Etendue
Nombre d'erreurs			
DT	3,18	2,14	0 - 7
DI	16,16	12,85	2 - 37
Nombre d'essais			
DT	4,18	1,17	2 - 6
DI	7,37	2,43	3 - 10

Chacune des 12 intersections était agencée de la même façon et comportait le même nombre de points de repère. Nous avons cependant testé leur niveau de difficulté pour chaque groupe pris séparément (voir Figure 12). Les résultats de l'analyse de Friedman rapportaient un effet significatif de l'intersection sur le nombre d'erreurs pour le groupe DI ($\chi^2(11)=22,85$; $p=.02$), mais pas pour le groupe DT ($\chi^2(11)=11,94$; $p=.37$). La performance des participants avec une DI est plus influencée par les caractéristiques superficielles de la tâche, bien que le positionnement des repères soit identique entre les intersections. Les comparaisons par paires effectuées dans le groupe DI ne permettaient cependant pas de déterminer précisément un profil de difficulté pour les différentes intersections.

Figure 12. Répartition du nombre d'erreurs moyen par intersection en fonction du groupe



3.2. Données oculométriques

Analyses du biais de regard

Le biais de regard correspond à une orientation préférentielle des yeux en direction de la réponse choisie quelques millisecondes avant la prise de décision. Pour étudier ce biais, une analyse des zones observées (en coordonnées horizontales) par les participants durant les 1500 ms avant la prise de décision au premier et dernier essai a été conduite. Cet intervalle de temps a été choisi au regard de la méthodologie utilisée par Wiener et al. (2011). Ainsi, la probabilité pour chaque participant que la fixation soit dirigée vers la direction empruntée a été calculée. Un score moyen allant de 0 à 1 par participant a ensuite été réalisé sur deux durées (durée 1 : 1500 ms - 750 ms et durée 2 : 750 ms - 0 ms) avant que la réponse ne soit donnée (appui de la touche gauche ou droite). Les participants avec une DI ne parvenant pas tous à effectuer un itinéraire correct, ce calcul a été effectué en lien avec la réponse donnée par le participant, indépendamment de la justesse de la réponse.

Dans un premier temps, il a été vérifié que les deux groupes présentaient un biais de regard en comparant les moyennes obtenues à la valeur 0,5 (orientation au hasard du regard) pour le premier et le dernier essai et pour les deux durées d'enregistrement (voir Tableau 4). Les différences sont significatives pour l'ensemble des comparaisons (t de Student ; $p < .02$), à l'exception du premier essai pour la durée d'enregistrement 1 dans le groupe DI ($p = 0.35$). Les

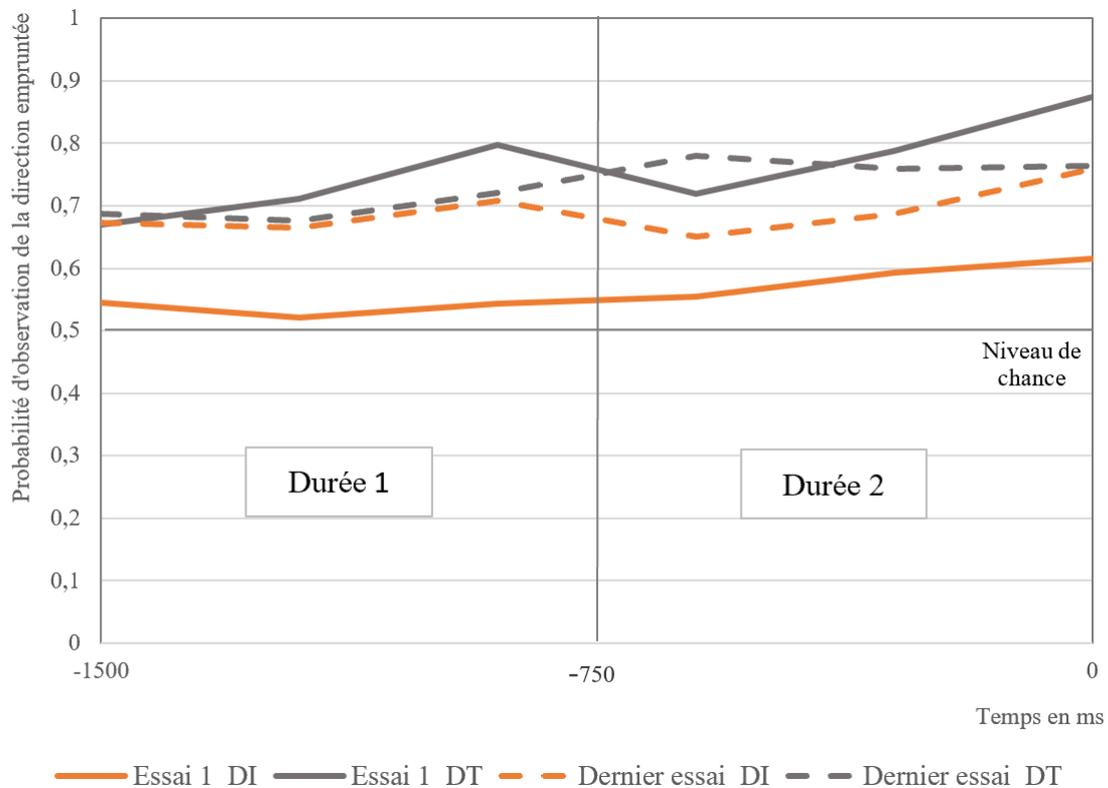
participants du groupe DI ne présentent donc pas de biais de regard entre 1500 ms et 750 ms avant l'émission de la réponse à l'occasion du premier essai. Pour le reste, un biais de regard était relevé dans les deux groupes.

Tableau 4. Probabilités moyennes d'observation de la direction empruntée en fonction de la durée, du groupe et de l'essai

Durée	DI		DT	
	1	2	1	2
Essai 1	0,54	0,60	0,72	0,77
Dernier essai	0,68	0,68	0,72	0,81

Pour évaluer les différences inter-groupes, des comparaisons de moyennes pour la durée 1 et pour la durée 2 ont été effectuées. Les analyses révélaient une différence significative entre les groupes pour la durée 1 ($t(28)=-3.094$; $p=.004$) et la durée 2 ($U(11,19)=28.5$; $p=.001$). Les participants du groupe DT observaient de manière plus fréquente la direction qu'ils allaient emprunter lors de la durée 1 (moyenne DT=.72 > moyenne DI=.61) et lors de la durée 2 (moyenne DT=.79 > moyenne DI=.67), en comparaison avec le groupe DI. Afin d'étudier les différences entre les groupes en fonction de l'essai, des comparaisons inter-groupes au premier et au dernier essai ont été faites. Les résultats montraient une différence significative entre les groupes lors de l'essai 1 pour la durée 1 et la durée 2 (durée 1 : $t(28)=-3,102$; $p=.004$; durée 2 : $t(28)=-2.892$; $p=.007$). Ainsi, les participants du groupe DT portaient davantage leur regard dans le sens de la direction empruntée de 1500 ms à 0 ms avant qu'ils ne donnent leur réponse. En ce qui concerne le dernier essai, il était relevé une différence significative uniquement lors de la durée 2 ($t(28)=-2.333$; $p=.027$). Les participants du groupe DT observaient davantage dans le sens de la direction uniquement lors des 750 ms qui précédaient leur réponse.

Figure 13. Probabilité d'observation de la direction empruntée en fonction de la durée, du groupe et de l'essai



Enfin, dans le but d'étudier l'effet de l'apprentissage sur le biais de regard, des analyses intragroupes ont été réalisées entre le premier et dernier essai dans chacun des groupes pour les durées 1 et 2. Des tests paramétriques ont été utilisés au vu de la répartition normale des scores. Concernant le groupe DT, il n'y avait pas de différence significative entre le premier et dernier essai pour les durées 1 et 2 (respectivement : $t(10)=.04$; $p=.96$ et $t(10)=-1.13$; $p=.28$). Concernant le groupe DI, les résultats montraient une différence significative lors de la durée 1 ($t(18)=-2.65$; $p=.02$), mais ne permettaient pas de montrer une différence lors de la durée 2 ($t(18)=-1.52$; $p=.15$). Les participants du groupe DI, observaient davantage la direction qu'ils empruntaient lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai, lors des 1500ms à 750ms qui précédaient leur réponse. Les résultats sont présentés sur la Figure 13.

Les points de repère et l'environnement

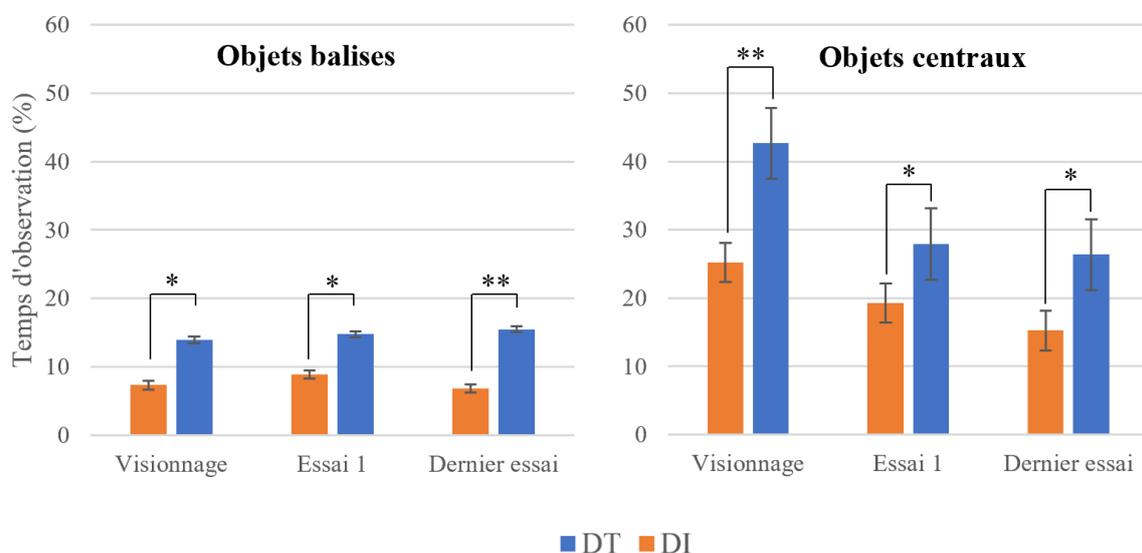
Les analyses réalisées révélait des différences significatives entre les groupes (DI et DT) et entre les temps de mesure (visionnage, premier essai, dernier essai) sur le pourcentage de temps

passé à observer les repères balises, les repères centraux et l'environnement. Sur l'entièreté des temps de mesure, les participants du groupe DT passaient en moyenne plus de temps à observer les repères que les participants du groupe DI, qu'ils soient centraux ($U(11,19)=169$; $p=.005$) ou balises ($U(11,19)=159$; $p=.02$). Inversement, les participants du groupe DI passaient plus de temps à observer l'environnement en comparaison au groupe DT ($U(11,19)=3$; $p<.001$).

Le temps de mesure avait un effet significatif pour l'observation des repères centraux (DI : $\chi^2(2)=9,57$; $p=.008$; DT : $\chi^2(2)=16,55$; $p<.001$), mais pas des balises ($p>.20$). Les deux groupes regardaient moins longtemps les repères centraux lors du dernier essai en comparaison avec la phase de visionnage ($p<.005$). Le temps de mesure avait aussi un effet significatif sur le pourcentage de temps passé à observer l'environnement dans les deux groupes (DI : $\chi^2(2)=10,84$; $p<.001$; DT : $\chi^2(2)=16,55$; $p<.005$). Les deux groupes de participants observaient davantage l'environnement lors du dernier essai ($p<.01$).

Concernant la comparaison entre les repères balises et les repères centraux, l'ensemble des participants passaient plus de temps à observer les repères centraux que les repères balises ($W=458$; $p<.0001$). Cet effet s'observait pour chaque temps de mesure pris séparément (visionnage, premier essai, dernier essai ; $p<.0001$) et dans chacun des groupes ($p<.01$). Les résultats sont présentés sur la Figure 14.

Figure 14. Pourcentage de temps passé sur les objets balises et centraux en fonction du groupe et de l'essai



Notes. * $p<.05$. ** $p<.01$.

Les repères congruents et non congruents

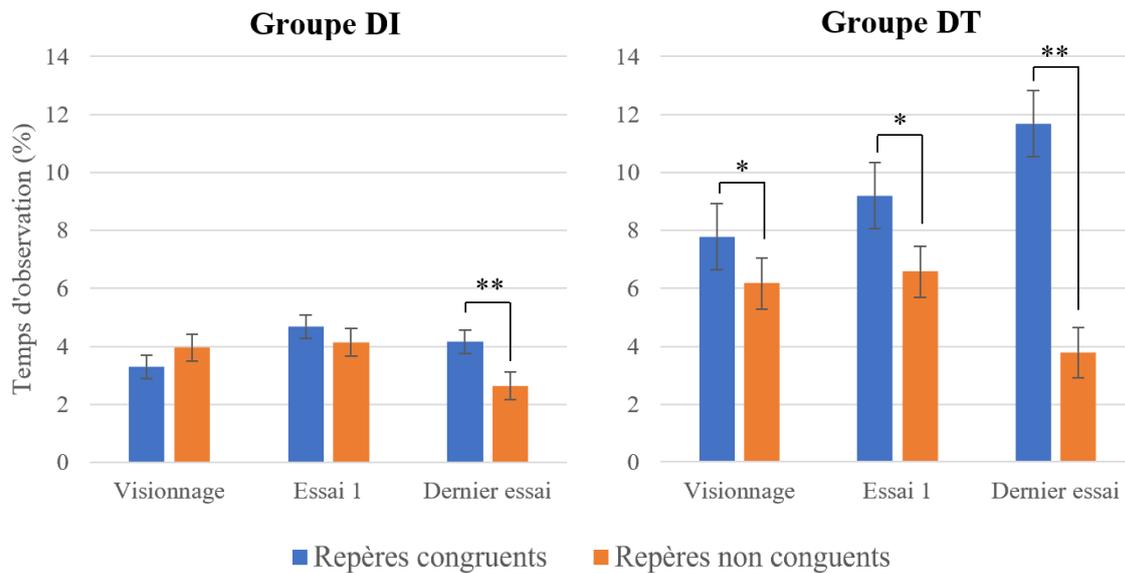
Afin d'identifier si les participants observaient de manière différente les repères en fonction de la direction empruntée, des analyses ont porté sur le pourcentage de temps moyen passé à observer les repères balises congruents (placés sur le chemin correct) et non congruents (placés sur le chemin incorrect).

Les analyses révélèrent des différences significatives entre les groupes sur le pourcentage de temps passé à observer les repères congruents ($U(11,19)=172$; $p=.002$). Sur l'entièreté des temps de mesure, les participants du groupe DT observaient les repères congruents durant un pourcentage de temps plus élevé que le groupe DI. Les analyses ne relevaient pas de différence significative entre les groupes concernant les repères non congruents ($U(11,19)=131$; $p=.27$).

Concernant les différences entre le temps passé à observer les repères congruents et celui passé à observer les non congruents, les analyses par groupe sur l'ensemble des temps de mesure montraient un effet significatif dans le groupe DT ($W=66$; $p=.0009$), mais pas dans le groupe DI ($W=135$; $p=.113$). Les participants du groupe DT passaient un pourcentage de temps supérieur à observer les repères congruents en comparaison aux non congruents. Les analyses portant sur chacun des trois temps de mesure du regard (visionnage, essai 1 et dernier essai) pris séparément révélèrent une différence significative aux trois temps de mesure dans le groupe DT ($p<.05$). Par contre, pour le groupe DI, la différence était significative pour le dernier essai uniquement ($W=161$; $p=.006$). Les participants du groupe DT observaient davantage les repères congruents dès la phase de visionnage et pour l'ensemble des essais, tandis que les participants du groupe DI observaient davantage ce type de repère uniquement lors du dernier essai.

L'effet du temps de mesure sur la durée passée à observer l'un ou l'autre des repères variait en fonction du groupe. Les analyses portant sur les repères congruents ne relevaient pas de différences significatives entre les temps de mesure ($p>.05$). À contrario, il existait un effet significatif du temps de mesure sur le pourcentage moyen de temps passé à observer les repères non congruents dans le groupe DI ($\chi^2(2)=6$; $p=.05$), mais pas dans le groupe DT ($p>.08$). Les comparaisons par paires avec le test des rangs signés de Wilcoxon révélèrent que les participants du groupe DI ont tendance à diminuer le temps passé à observer les repères non congruents entre le premier et dernier essai ($p=.06$). Les résultats sont présentés sur la Figure 15.

Figure 15. Pourcentage de temps passé sur les objets balises congruents et non congruents en fonction du groupe et de l'essai



Notes. * $p < .05$. ** $p < .01$.

Analyse des paramètres oculaires

L'analyse des résultats ne permet pas de montrer une différence significative entre les deux groupes concernant l'ensemble des paramètres oculaires (voir tableau 5). Néanmoins, le groupe DI a tendance à effectuer des saccades plus longues que le groupe au développement typique ($t(28) = -1,90, p = 0,07$).

Tableau 5. Moyennes et résultats des comparaisons des paramètres oculaires dans les groupes

Paramètres visuels	Moyenne (ET) DT	Moyenne (ET) DI	Valeur de p
Nombre de fixations	320,72 (59,43)	323 (79,74)	>0,10
Durée moyenne fixations (ms)	323,08 (90,16)	327,54 (176,16)	>0,10
Durée moyenne saccades (ms)	55,8 (12,47)	69,51 (26,79)	0,07
Amplitude moyenne saccades (°)	0,25 (0,06)	0,31 (0,14)	>0,10
Fréquence moyenne des saccades (/s)	2,74 (0,52)	2,75 (0,68)	>0,10

3.3. Analyses de corrélation

Des analyses de corrélation de Spearman ont été calculées entre le pourcentage moyen de temps passé à observer chaque zone d'intérêt et le nombre d'erreurs afin d'identifier d'éventuels liens entre les comportements d'observation et les performances de déplacement. Les analyses révélaient une corrélation significative dans le groupe DI entre le pourcentage moyen de temps passé à observer les repères non congruents lors du dernier essai et le nombre d'erreurs ($r=.47$; $p=.04$). De fait, plus les personnes du groupe DI observaient les repères non congruents lors du dernier essai, plus elles faisaient d'erreurs. Une absence de corrélation significative était relevée dans le groupe DT pour les repères non congruents ($r=.37$; $p=.27$) ainsi que pour les repères congruents dans les deux groupes (DI : $r=.25$; $p=.29$; DT : $r=.23$; $p=.50$).

Enfin, des analyses de corrélation ont été faites entre la saillance des repères et le pourcentage de temps passé à les observer afin de déterminer la sensibilité à la saillance visuelle dans chaque groupe. Pour ce faire, un score de saillance allant de 0 à 5 a été déterminé grâce aux cartes de saillance. Un score élevé correspondait à un repère saillant visuellement. Les analyses révélaient une corrélation significative dans les deux groupes (DI : $r=.49$; $p<.001$; DT : $r=.31$; $p<.05$). Ainsi, plus les repères étaient saillants, plus ils étaient observés par les participants des deux groupes.

4. Discussion

L'objectif de cette recherche était d'étudier les différences dans la prise d'informations entre les personnes présentant une DI et les personnes au DT lors d'une tâche d'apprentissage d'itinéraires. S'agissant de l'apprentissage lui-même, nos résultats vont dans le sens de nombreuses autres études. Les participants du groupe DI commettent un nombre plus important d'erreurs et ont besoin de plus d'essais pour apprendre un itinéraire (Courbois, Farran, et al., 2013; Mengue-Topio et al., 2011; Purser et al., 2015). Il est à noter que le nombre d'erreurs varie significativement en fonction de l'intersection dans le groupe DI, alors que ce n'est pas le cas dans le groupe DT. La nature des repères affichés à chaque intersection semble donc interférer avec le processus de décision des participants DI, alors qu'elle n'influence pas celui des participants DT. Les participants avec DI réagissent plus aux caractéristiques des stimuli que les participants DT. Réactivité plus importante à la saillance perceptive ou à la saillance sémantique de certains stimuli ? D'autres recherches seraient nécessaires pour explorer cette question. Considérons maintenant les données oculométriques. Les résultats de chacun des groupes seront discutés, pris séparément, avant de centrer la discussion sur les comparaisons inter-groupes.

4.1. Participants au développement typique

Les participants du groupe DT observent davantage les repères centraux que les repères balises. Compte tenu de l'importance des balises dans l'apprentissage d'itinéraire (De Condappa, 2016; Waller & Lippa, 2007), l'inverse était prédit. Ce résultat est partiellement imputable à une limite méthodologique de l'étude. Le regard est effectivement naturellement attiré vers le centre d'une scène visuelle lors des premiers instants d'observation (Bindemann, 2010; Tatler, 2007). Les repères situés au centre de l'écran étaient donc probablement sous l'effet de ce processus *bottom-up* appelé « biais d'observation central ». Notons par ailleurs que la réduction de la durée de fixation des repères centraux entre la phase de visionnage et le dernier essai de la phase d'apprentissage reflète probablement une diminution de l'influence de ce biais dans l'analyse visuelle de la scène. En dehors de cela, il est possible que le temps alloué aux repères centraux soit aussi le signe de la mobilisation d'une stratégie de type associative. De Condappa (2016) a effectivement montré que, si les participants ont tendance à utiliser davantage les repères balises, ils encodent néanmoins, de manière conjointe, les informations nécessaires à la mise en place d'une stratégie associative. Dans le même sens, certains chercheurs en cognition spatiale avancent l'idée que les personnes développent en parallèle, dès la première exposition, plusieurs

types de connaissances spatiales (Ishikawa & Montello, 2006; Wang et al., 2014). La méthodologie employée ne permet pas de conclure définitivement sur ce point.

En ce qui concerne la mise en place de la stratégie d'observation basée sur les repères balises, il était attendu que les participants du groupe DT allouent leur attention aux repères congruents avec la direction à emprunter dès la phase de visionnage. Cette hypothèse est confirmée, les participants au développement typique observent davantage les repères congruents plutôt que les repères non congruents durant l'ensemble des temps de mesure. Ces résultats corroborent ceux d'autres études qui révèlent une durée d'observation supérieure des repères positionnés en direction du chemin à emprunter (Röser et al., 2013; Wenzel et al., 2017). Ils sont à mettre en relation avec les recherches de De Condappa (2016) qui montrent que les participants mémorisent davantage la position des repères congruents avec la direction plutôt que celle des repères non congruents, et qu'ils retiennent mieux la direction associée aux repères congruents plutôt que celle associée aux repères non congruents. Enfin, l'observation de cet effet dès la première exposition à l'environnement va dans le sens des conclusions de Wang et al. (2014) qui ont montré que la stratégie de type balise était préférée par les participants dès le premier essai en comparaison avec d'autres types de stratégies d'orientation.

Concernant la prise de décision, les participants du groupe DT observent la direction qu'ils souhaitent emprunter 750 millisecondes avant leur prise de décision de direction. Ils manifestent ainsi un biais de regard tout à fait comparable à celui obtenu par Wiener et al. (2011) lors d'une tâche d'apprentissage d'itinéraire en EV, et ce malgré les différences entre les protocoles expérimentaux (images statiques et nombre plus faible de repères chez Wiener et collaborateurs). Ces résultats confirment l'intérêt d'utiliser cet indicateur dans un contexte de navigation spatiale. En revanche, dans la présente expérience, le biais de regard se manifeste dès 1500 millisecondes avant la prise de décision. Ce résultat peut s'expliquer par la nature de notre tâche. En effet, contrairement à Wiener et al., la tâche de navigation s'effectue de manière dynamique et permet donc un apprentissage séquentiel. De fait, les participants pourraient anticiper leur réponse dès l'intersection précédente et orienter leur attention dans le sens de cette réponse. Concernant l'effet d'apprentissage entre le premier et le dernier essai, les résultats ne permettent pas de mettre en évidence la présence d'un biais de regard. Ce dernier va à l'encontre d'autres recherches étudiant l'effet de l'apprentissage sur l'attention visuelle lors d'une prise de décision (Orquin & Mueller Loose, 2013). Il est possible que cet effet soit lié au faible niveau de difficulté de la tâche, créant ainsi un effet plafond.

4.2. Participants présentant une déficience intellectuelle

On retrouve chez ces participants des résultats similaires à ceux du groupe DT. Ils passent effectivement plus de temps à regarder les repères centraux que les repères balises et la durée d'observation des repères centraux diminue entre la phase de visionnage et la phase d'apprentissage. Ces résultats peuvent être rapprochés de ceux de Carlin et al. (2003) qui montraient l'existence d'un biais d'observation central chez les personnes avec une DI.

Concernant les repères balises, contrairement au groupe DT, il n'y a pas de différence significative entre le temps passé à observer les repères congruents et incongruents lorsque l'analyse porte sur l'ensemble des temps de mesure. Ces résultats sont à mettre en perspective avec les difficultés de sélection observées par Courbois et al. (2012) qui ont montré que ces personnes peuvent sélectionner des repères moins optimaux pour le déplacement. Ils sont également cohérents avec les données de Farran et al. (2016) qui ont remarqué que les personnes avec un syndrome de Williams n'identifient pas le caractère aidant de certains points de repère pour l'apprentissage (elles regardent autant les objets identiques placés à différents endroits du trajet que les objets uniques, alors que ces derniers facilitent la navigation spatiale). Lorsque l'analyse porte sur les différents temps de mesure du regard pris séparément, les personnes avec une DI passent significativement plus de temps à observer les repères congruents plutôt qu'incongruents lors du dernier essai uniquement. Nous remarquons aussi une diminution du temps passé à observer les repères non congruents entre le premier et le dernier essai. Il semblerait donc que les personnes avec une DI parviennent à mettre progressivement en place une stratégie de sélection efficace après plusieurs expositions (contrairement aux participants DT qui le font dès le début de l'expérience). Ces résultats peuvent être rapprochés des études portant sur l'attention sélective. Les personnes avec une DI ont effectivement des difficultés dans la mise en place de stratégies de recherche visuelle ainsi que dans l'inhibition des stimuli distracteurs (Merrill, 2006; Merrill & O'dekirk, 1994). Cependant, elles sont aussi capables d'améliorer leur recherche visuelle en focalisant leur attention sur certains éléments d'une scène visuelle lorsqu'une consigne d'observation est donnée (Carlin et al., 2002). Les feedbacks de réponse de direction, dispensés au fil des essais, pourraient les avoir guidées dans la mise en place d'une stratégie visuelle aidante et dans le désengagement attentionnel des repères non pertinents.

Au sujet du biais de regard, les personnes avec une DI observent également la direction qu'ils souhaitent emprunter 750 millisecondes avant la prise de décision avec une probabilité qui ne peut pas être due au hasard. Aucune étude à notre connaissance n'avait étudié ce phénomène dans cette population. Ce résultat n'est cependant pas surprenant, car la relation entre attention et prise de décision est précoce d'un point de vue développemental. Saito et al. (2020) ont démontré qu'elle commence à se manifester dès l'âge de 2 ans chez l'enfant au développement typique. Concernant l'effet de l'apprentissage, l'orientation du regard vers la direction à emprunter augmente entre le premier et le dernier essai pour la durée 1 (entre 1500 et 750 ms avant qu'ils ne donnent leur réponse). Cette augmentation traduit l'apparition d'un biais de regard qui était inexistant à l'occasion du premier essai. Ainsi, avec la répétition des essais, il est possible que les participants avec une DI parviennent à anticiper leur réponse au sortir de l'intersection précédente (les informations d'une intersection annonçant, d'une certaine façon, l'intersection suivante) comme les participants DT. Ce résultat pourrait traduire l'apprentissage d'un comportement d'anticipation de prise de décision de direction, comme évoqué par Geisen et al. (2021) auprès de personnes âgées.

4.3. Comparaison entre les personnes au développement typique et celles présentant une déficience intellectuelle

Conformément aux hypothèses, plusieurs différences entre les groupes concernant le temps passé à observer l'environnement sont observées. Premièrement, les participants présentant une DI passent plus de temps à observer les zones sans points de repère. Ce résultat est conforme à celui observé par Farran et al. (2016) chez des personnes présentant un syndrome de Williams en comparaison avec des enfants au développement typique âgés de 6 à 10 ans. Ainsi, une partie des erreurs de direction émises par les personnes avec une DI pourrait être liée à un défaut d'observation des points de repère qui se répercuterait sur leur mémorisation (Hamid et al., 2010). Le manque d'observation des points de repère pourrait s'expliquer par les difficultés en attention sélective relevées chez les personnes avec une DI (Merrill, 2006) qui provoqueraient une analyse plus diffuse de l'environnement. Il est à noter que ce pattern d'observation a également été mesuré auprès de personnes vieillissantes en comparaison avec de jeunes adultes (Grzeschik et al., 2019).

Nous avons formulé l'hypothèse que les personnes au développement typique passeraient une durée supérieure à observer les repères congruents avec la direction en comparaison avec les personnes avec une DI. Cette hypothèse a été vérifiée, les participants du groupe DT passent en moyenne un pourcentage de temps deux fois plus élevé à observer les repères congruents en

comparaison avec les participants présentant une DI. Si les participants avec une DI observent moins les repères congruents que les DT, il n'y a cependant pas de différence significative entre les deux groupes pour les repères non congruents avec la direction. Les analyses de corrélation indiquent cependant un lien entre le temps passé à observer ces repères lors du dernier essai et le nombre d'erreurs dans le groupe DI. La sélection de ces points de repère moins pertinents pour la navigation spatiale serait source d'erreurs chez ces personnes. Paradoxalement, nous ne trouvons pas le lien significatif entre l'observation des repères congruents et la réussite. Cette étude nous donne donc des informations sur ce qui pourrait expliquer les erreurs, sans toutefois indiquer clairement ce qui permet de réussir. Notons cependant que la durée d'observation des repères congruents est inférieure dans cette population.

Ainsi, un défaut de sélection des points de repère pertinents semble altérer l'apprentissage d'itinéraires. Nous pouvons nous demander s'il n'impacterait pas aussi l'élaboration des cartes cognitives par voie de conséquence. Cette hypothèse est plausible (un défaut de sélection des points de repère distants pourrait, par exemple, expliquer des difficultés de réorientation dans une ville, Courbois et al., 2012), mais elle ne suffit pas pour expliquer les difficultés d'élaboration des cartes cognitives. Dans l'étude réalisée par Mengue-Topio et al. (2011), les participants avec une DI ont appris à reproduire deux itinéraires distincts sans faire d'erreurs (de A vers B ; de A vers C). Ils n'étaient pourtant pas capables de les combiner pour former un raccourci (de B vers C). La connaissance d'itinéraires dans un environnement donné ne garantit donc pas l'élaboration d'une carte cognitive de cet espace. On peut donc conclure que, si la mauvaise sélection des points de repère contribue fortement à la mauvaise qualité des représentations spatiales, elle ne peut cependant l'expliquer à elle seule.

Concernant la prise de décision, conformément à nos hypothèses, les personnes au développement typique ont un biais de regard plus important que les personnes présentant une DI lors du premier et dernier essai. Ainsi, il semblerait que la concordance entre le comportement visuel et la réponse comportementale soit plus faible chez les personnes avec une DI. Il est également possible que le phénomène de prise de décision des personnes avec une DI soit parasité par la présence des repères centraux. Il est à noter que la différence entre les deux groupes s'amenuise au point de devenir non significative lors du dernier essai, de 1500 à 750 ms avant la réponse. Ce résultat suggère l'effet bénéfique de la répétition des essais sur l'anticipation des réponses chez les personnes avec une DI, ce qui souligne, une nouvelle fois, leurs capacités d'apprentissage. Ces éléments sont encourageants pour la création de programmes d'entraînements aux habiletés spatiales.

Enfin, nous avons comparé les différents paramètres oculaires entre les deux groupes. Les résultats n'ont démontré aucune différence significative entre les deux groupes mis à part une tendance à la différence concernant la durée moyenne des saccades. Les participants du groupe DI ont tendance à effectuer des saccades plus longues que les participants du groupe au développement typique. Ce résultat correspond à celui mesuré par Csákvári et al. (2014) lors de tâche d'évaluation des mouvements oculaires élémentaires. De surcroît, une augmentation de la durée des saccades peut être un indicateur d'une charge cognitive élevée (Zagermann et al., 2016). Ainsi, ce résultat pourrait suggérer une charge cognitive plus importante dans le groupe DI lors de l'apprentissage de l'itinéraire, ce qui expliquerait le nombre important d'erreurs. L'absence de différence entre les groupes concernant la majorité des paramètres oculaires de base indiquerait que les difficultés rencontrées par les personnes avec une DI ne sont pas liées à des troubles oculomoteurs, mais davantage à un déficit stratégique, ce qui correspond à l'hypothèse formulée par Courbois et al. (2012). Ce résultat reste néanmoins surprenant au vu de la forte prévalence de troubles oculaires au sein de cette population (van Splunder et al., 2006).

4.4. Limites de la recherche

Cette recherche comporte quelques limites qu'il convient de mentionner. Dans un premier temps, il est à noter que les participants présentant une DI ont un nombre plus faible de données oculométriques valides comme cela avait été trouvé par Csákvári et Gyori (2015). Cette limite pourrait être amoindrie en ayant recours à un matériel adapté aux mouvements fréquents de la tête et par l'utilisation d'un joystick pour indiquer les réponses de direction. En effet, si les participants au développement typique parviennent à donner leur réponse sans observer le clavier, certaines personnes du groupe DI ne parviennent pas à automatiser ce mode de réponse. Ainsi, lorsque certains participants avec une DI saisissent leurs réponses, ils observent le clavier ce qui entraîne une perte de données oculaires. Cette limite pourrait aussi être diminuée par un contrôle précis de l'absence de troubles oculaires qui sont fréquents chez les personnes avec une DI (van Splunder et al., 2004).

Par ailleurs, si l'EV de cette expérience est similaire à ceux utilisés dans plusieurs études (Farran et al., 2016 ; Mengue-Topio et al., 2011 ; Purser et al., 2015), il représente quelques limites à l'analyse des mouvements oculaires. Afin d'uniformiser les trajectoires visuelles, la présentation d'une croix de fixation avant chaque affichage d'une intersection serait nécessaire, comme cela est fait dans certaines études (De Condappa et Wiener, 2016). De même, il serait pertinent de modifier la disposition des repères pour que leur position soit adaptée à certains

biais, tels que le biais d'observation central (Tatler, 2007). Effectivement, face à un écran, les individus ont tendance à fixer leur attention au centre de la scène durant la première exposition. Nos deux groupes de participants regardent effectivement plus les repères centraux que les repère balises, même si la durée d'observation des repères centraux diminue entre le premier et le dernier essai. De fait, placer les points de repère hors du centre de la scène visuelle permettrait d'obtenir des données non influencées par ce biais.

Nous avons fait le choix de comparer les deux groupes de participants en les appariant sur l'âge chronologique, ce qui nous amène à nous questionner sur les potentiels résultats obtenus avec un appariement selon l'âge développemental. Farran et al. (2016) ont réalisé un appariement selon les capacités langagières (8 ans) et de raisonnement (6 ans) ce qui leur a permis de montrer que les personnes avec un Syndrome de Williams observaient moins les points de repère que les enfants âgés de 6 et 8 ans. Leurs résultats étaient donc en faveur de l'hypothèse d'un déficit de sélection plutôt que d'un simple retard de développement. La réplication de notre recherche avec un appariement basé sur l'âge développemental serait nécessaire pour confirmer cette hypothèse avec des participants dont la déficience intellectuelle n'est pas causée par un syndrome de Williams.

Enfin, cette expérience a été réalisée en EV, ce qui pose la question de la généralisation des résultats aux environnements réels. D'une façon générale, les résultats obtenus dans des tâches de navigation spatiale en EV s'observent aussi en environnement réel (voir Waller, 2000), y compris chez les personnes avec une DI (Courbois, Mengue-Topio, et al., 2013). Cependant, il serait important de réaliser le même type d'expérience à l'aide de lunettes *eye-trackers* dans des environnements plus écologiques pour vérifier que nous obtenons les mêmes effets.

5. Conclusion

Cette étude, qui fait partie des premières à utiliser l'oculométrie, montre la pertinence de cet outil pour étudier les performances en navigation des personnes présentant une DI. Les résultats confirment ceux d'autres recherches qui indiquent que les personnes avec DI regardent plus les zones de l'environnement sans point de repère à l'occasion d'un déplacement (Farran et al., 2016) et qu'elles manquent de sélectivité dans le choix des points de repère (Courbois et al., 2012). Ils permettent cependant d'aller au-delà de ces observations, en étudiant au plus près leur prise d'information à l'occasion d'un déplacement. Les repères balises (principalement les congruents) permettent un apprentissage d'itinéraire rapide, au moindre coût cognitif (De

Condappa & Wiener, 2016). C'est probablement pour cela qu'ils sont sélectionnés par les personnes au développement typique, au moins en début d'apprentissage. Les personnes avec une déficience intellectuelle manquent de ressources cognitives (Courbois & Facon, 2014), que ce soit en mémoire de travail (Lanfranchi et al., 2004) ou dans les fonctions exécutives (Danielsson et al., 2010). La sélection des repères balises congruents avec la direction leur permettrait donc d'apprendre plus efficacement les itinéraires. Pourtant, elles ne le font pas spontanément. Une évolution est cependant observée quant à la prise d'information avec la répétition des essais. En fin d'apprentissage, les personnes regardent plus longtemps les repères congruents que les repères non congruents, même si la durée de fixation reste bien inférieure à celle du groupe DT.

Compte tenu de ces observations, il peut être conclu que les méthodes d'apprentissage de la mobilité pour les personnes avec une déficience intellectuelle devraient comporter un entraînement à la sélection de points de repère balises congruents avec la direction à emprunter. Il peut être aussi supposé que ces personnes seraient répondantes à ce type d'intervention, car, bien que ce soit loin d'être systématique, leur comportement évolue dans ce sens avec la répétition des essais.

Points importants de la première étude :

- Dans une tâche de navigation spatiale en environnement virtuel, la performance des personnes avec une DI semble être plus influencée par les propriétés visuelles des intersections que celle des personnes au développement typique.
- Les personnes avec DI regardent moins longtemps les repères et passent plus de temps à observer l'environnement.
- Comme les personnes avec un DT, elles présentent un biais de regard juste avant d'émettre leur réponse.
- La stratégie de sélection des repères balises congruents apparaît en fin d'apprentissage chez les personnes avec une DI, alors qu'elle est présente dès la phase de visionnage chez les personnes au DT.

CHAPITRE 5 :
L'OBSERVATION DES POINTS DE REPÈRE BALISES ET
ASSOCIATIFS : QUELS EFFETS SUR L'APPRENTISSAGE
D'ITINÉRAIRES CHEZ LES PERSONNES AVEC UNE
DÉFICIENCE INTELLECTUELLE ? (ÉTUDE 2)

Cette étude a fait l'objet de deux communications orales dont une réalisée en langage simplifié présente en Annexe 11.

1. Objectif de l'étude et hypothèses de recherche

La première étude a permis de mettre en évidence une durée d'observation plus faible des points de repère par les personnes présentant une DI. De même, ces personnes observaient moins longtemps les repères positionnés sur le chemin correct avant de donner leur réponse. Néanmoins, cette étude exploratoire comportait des biais méthodologiques tels que la présence de repères au centre de l'intersection. De même elle ne permettait pas d'évaluer séparément l'influence des repères balises et associatifs sur l'apprentissage d'itinéraires, car les intersections comportaient ces deux types de repères. Ainsi, le premier objectif de cette deuxième étude est de corriger ces limites méthodologiques en évaluant l'influence de chaque type de repère séparément, mais aussi en proposant des situations avec les deux types de repères et sans aucun point de repère. Dans ce cadre, nous avons adapté le protocole de Waller et Lippa (2007) en nous inspirant de celui réalisé par De Condappa et Wiener (2016) pour éviter la présence d'informations visuelles au centre de l'intersection. Le protocole est composé de quatre itinéraires : un sans points de repère, un composé de repères balises, un de repères associatifs et un composé des deux types de repères. Concernant les repères associatifs, plutôt que de les positionner au centre de l'intersection comme Waller et Lippa, nous avons fait le choix de les positionner de part et d'autre de l'intersection en répétant deux fois la même image. Ce choix a été effectué, car le regard est systématiquement attiré par le centre de la scène visuelle (Tatler, 2007), ce qui aurait biaisé le temps alloué aux repères positionnés au centre. Le second objectif de cette recherche est d'étudier l'influence du type de point de repère sur le niveau de charge cognitive. La charge cognitive peut se mesurer à l'aide de la dilatation pupillaire, une dilatation pupillaire élevée étant le signe d'un niveau de charge cognitive important (Kahneman & Beatty, 1966). En environnements virtuels, De Condappa et Wiener (2016) ont montré que les participants n'ont pas le même niveau de charge cognitive s'ils emploient une stratégie de déplacement basée sur les repères ou sur la configuration de l'environnement. La charge cognitive étant plus faible lorsque le déplacement se base sur les repères. Or, comme énoncé par Waller et Lippa, les repères balises ne font pas appel à la même stratégie que les repères associatifs. Les repères balises impliquent uniquement un apprentissage basé sur la reconnaissance tandis que les repères associatifs impliquent l'apprentissage d'une association entre les repères et la direction à emprunter. Sur la base de

cette analyse, nous pouvons donc supposer que le niveau de charge cognitive est plus élevé lors d'un apprentissage impliquant les repères associatifs.

Au vu des précédentes études, nous nous attendons à ce que les personnes présentant une DI effectuent un nombre plus important d'erreurs et d'essais dans l'ensemble des itinéraires en comparaison avec le groupe DT. De même, en lien avec les résultats observés par Waller et Lippa (2007) nous faisons l'hypothèse que l'ensemble des participants fassent moins d'erreurs dans l'itinéraire comprenant les repères balises. Néanmoins, en raison des difficultés de sélection des points de repère soulevées chez les personnes avec une DI (Courbois et al., 2012), nous nous attendons à ce qu'elles fassent plus d'erreurs dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères en comparaison avec l'itinéraire comprenant uniquement les repères balises.

En ce qui concerne les temps d'observation des repères, nous nous attendons aux mêmes résultats que ceux de Farran et al. (2016) et de notre première étude, avec une durée d'observation plus faible chez les personnes avec une DI. Nous anticipons également une observation plus importante des repères balises en comparaison aux repères associatifs dans le groupe DT lorsque l'itinéraire comporte ces deux types de repères. En revanche, nous ne nous attendons pas à relever cette différence dans le groupe DI.

Afin d'évaluer l'effet du type d'itinéraire sur le niveau de charge cognitive, nous avons également, à titre exploratoire, mesuré la dilatation pupillaire des participants durant la réalisation de la tâche. Nous faisons l'hypothèse d'une dilatation pupillaire plus élevée dans le groupe DI, ce qui indiquerait un niveau de charge cognitive supérieur au groupe DT. Nous nous attendons aussi à observer une dilatation pupillaire plus élevée dans les deux groupes dans l'itinéraire sans points de repère en comparaison avec l'itinéraire composé de repères balises. Enfin, nous nous attendons à ce que la dilatation pupillaire soit plus élevée dans la condition repères associatifs comparativement à la condition balises.

2. Méthodologie

2.1. Participants

Deux groupes de participants ont été recrutés pour cette recherche. Le premier groupe est constitué de 21 participants (4 femmes et 17 hommes) avec une déficience intellectuelle (DI) âgés en moyenne de 30,3 ans. Les participants recrutés travaillaient dans deux ESAT et ont été sélectionnés d'après un diagnostic de déficience intellectuelle légère non associée à une étiologie génétique. L'étude leur a été présentée lors d'un entretien individuel à l'aide d'une

fiche de présentation réalisée en langage simplifié puis leur accord de participation (rédigé également en langage simplifié) a été recueilli la semaine suivante par écrit (voir Annexe 6b et 7b). Dans le cas des personnes sous protection juridique, l'accord de leur représentant légal a également été recueilli. Le deuxième groupe de participants composé de 21 personnes (7 femmes et 14 hommes) a été recruté au sein de l'Université de Lille. La présentation de l'étude et le formulaire de consentement sont présentés en Annexe 6a et 7a. Les participants étaient âgés en moyenne de 22,8 ans. L'ensemble des participants ont été recrutés sur un critère d'âge compris entre 18 et 40 ans ainsi que sur l'absence de troubles oculaires. Cette étude a fait l'objet d'une validation par un comité d'éthique et de recherche sous la référence : 2021-516-S95. L'ensemble des données descriptives concernant l'âge, le sexe ainsi que les scores aux Progressives Matrices de Raven's 2 des participants sont présents dans le Tableau 6.

Tableau 6. Informations concernant les participants

	Moyenne	Écart-type	Étendue
Âge (années;mois)			
DT (n=21)	22,8	3,24	19,3-29,3
DI (n=21)	30,3	6,18	19,3-40,2
Scores aux Matrices ¹			
DT	104,6	17,71	78-140
DI	60,5	9,14	40-78

*Note.*¹Note standard aux Progressives Matrices de Raven's 2.

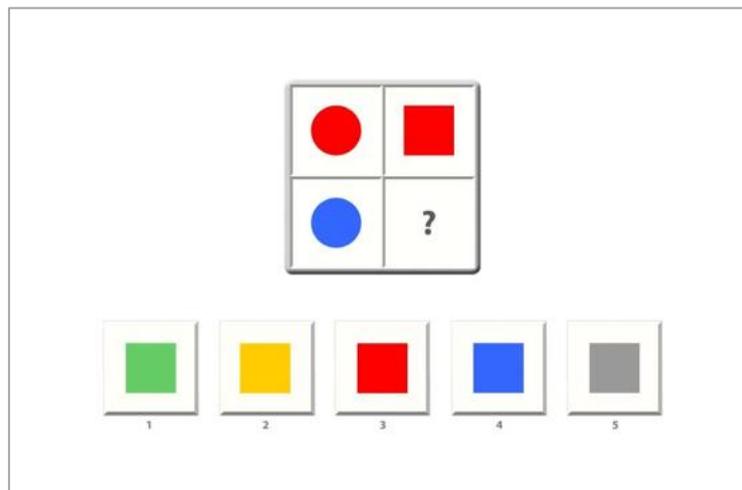
2.2. Matériel

Test des Matrices Progressives de Ravens '2

Afin de contrôler les capacités d'induction et de déduction non verbales, les « RAVEN'S 2 - Matrices Progressives » (Raven, 2019) ont été utilisées (voir Figure 16). Le test est étalonné auprès de personnes françaises âgées de 4 à 69 ans et 11 mois. Pour les passations, la version de 9 ans à 69 ans - 11 mois a été utilisée (en version papier) pour les personnes du groupe DT. Cette version est composée de 48 items dont le temps de passation est estimé à 45 minutes

environ. Les participants du groupe DI ont passé la version de 4 ans à 8 ans - 11 mois composée de 36 items. Le temps de passation de cette version est estimé à 30 minutes. Lors de chaque item, le participant observe une suite de figures géométriques et doit parmi une liste de 5 réponses possibles choisir l'image qui s'adapte le mieux à la liste de figures. Les items sont répartis en catégories de 12 items chacun (A, B, C, D, E). La version passée par les personnes avec une DI concerne les catégories A, B et C tandis que la version passée par les personnes du groupe DT comprend les catégories B, C, D, E. Les bonnes réponses sont cotées 1, tandis que les mauvaises sont cotées 0. Ces réponses donnent lieu à un score sur 48, un score élevé indiquant une performance élevée.

Figure 16. Exemple d'un item du test « RAVEN'S 2 - Matrices Progressives » (Raven, 2019)

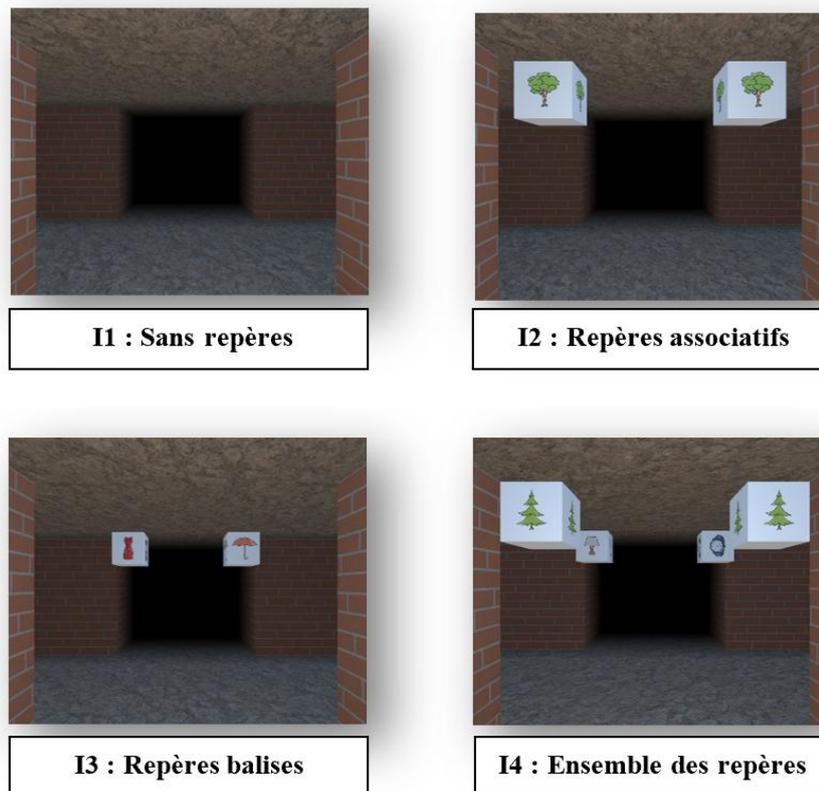


Environnement virtuel

L'environnement virtuel (EV) utilisé a été conçu à l'aide du logiciel *UNITY*[®] et présenté sur un ordinateur portable de 17 pouces avec une résolution de 1920x1080 pixels. Le design de l'EV était sous forme d'un labyrinthe en briques rouges avec le sol et le plafond d'intensité lumineuse similaires. Quatre itinéraires différents de 8 intersections ont été conçus en faisant varier le nombre et la position des points de repère : un itinéraire sans repère, un avec des repères associatifs (2 repères identiques), un avec des repères balises (2 repères différents) et un avec les deux types de repères. Les repères ont été positionnés de part et d'autre de l'intersection dans des cubes blancs à égale distance du centre de la scène visuelle. Les repères utilisés sont issus de la base de données IMABASE et sélectionnés d'après un critère de familiarité et

d'accord avec le nom (Bonin et al., 2020). Un aperçu des quatre itinéraires est présenté en Figure 17.

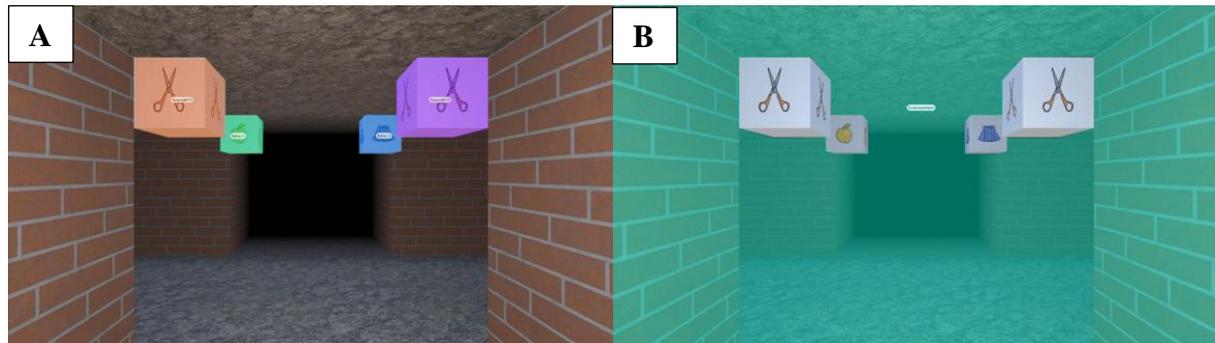
Figure 17. *Aperçu des différents itinéraires*



Données oculaires

Les données oculaires ont été enregistrées à une fréquence de 120Hz, à l'aide d'une barre oculométrique TobiiProFusion fixée sous l'écran d'ordinateur. Les participants étaient positionnés à une distance de 64 cm de l'écran dans une pièce où la luminosité était contrôlée. Une calibration en 5 points a été utilisée. Les données ont été enregistrées et traitées à partir du logiciel TobiiProLab et du filtre I-VT (fixation). Les données oculaires ont été analysées pour chaque itinéraire sur des temps d'intérêt précis : pour chaque intersection, l'intervalle de temps entre l'apparition des repères jusqu'à la phase de réponse pour le premier et dernier essai. Afin d'analyser les durées de fixation, trois zones d'intérêt ont été définies : les repères associatifs, les repères balises et l'environnement (mur, sol et plafond) (voir Figure 18).

Figure 18. Zones d'intérêt créées pour les analyses

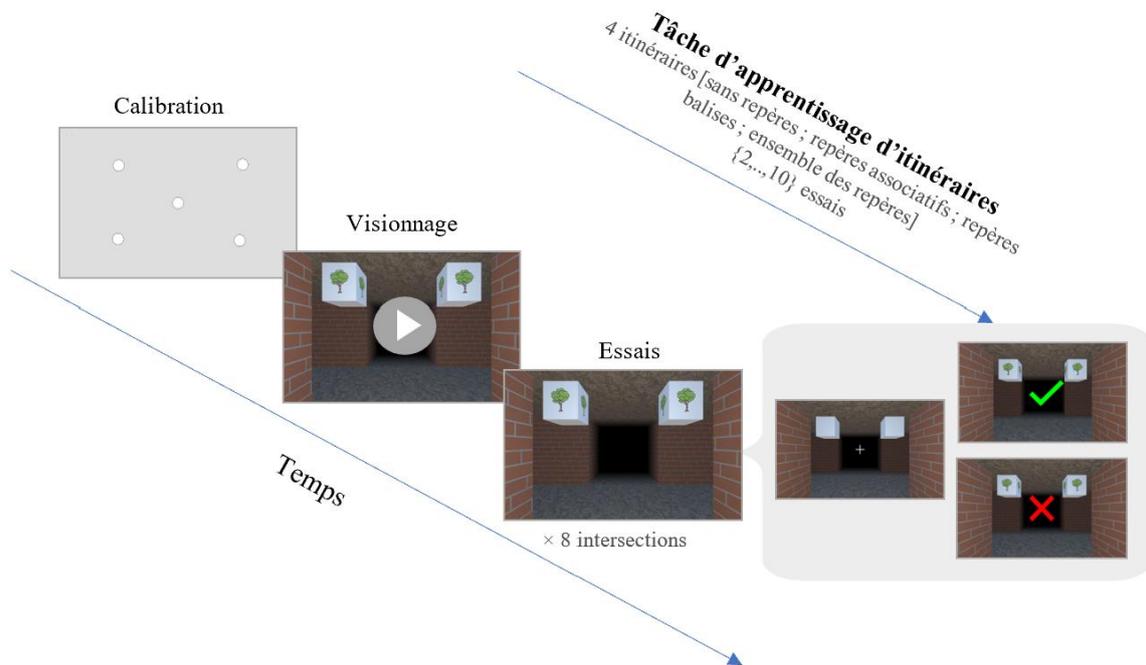


Note. A : repères associatifs et balises ; B : environnement

Tâche d'apprentissage d'itinéraires

Durant la phase d'apprentissage d'itinéraires, les participants ont observé le chemin correct par le biais d'une vidéo où ils étaient transportés passivement dans l'environnement. Dans un second temps, les participants ont débuté la phase de test durant laquelle ils étaient transportés entre chaque intersection. Avant chaque phase de réponse, une intersection sans points de repère avec une croix de fixation au centre était présentée pendant 1500 ms (mesure de base). Puis à l'apparition des repères, les participants devaient indiquer la direction correcte à l'aide des touches directionnelles du clavier (gauche ou droite). Un feedback visuel était fourni aux participants à la suite de leur réponse (coche vert ou croix rouge). Pour réussir l'essai, les participants devaient réaliser 2 essais consécutifs sans erreurs (critère d'apprentissage). Les participants disposaient pour chaque itinéraire de 10 essais maximum pour réaliser le chemin correct. L'ordre des itinéraires était présenté de manière contrebalancée entre les participants. Le nombre d'erreurs et d'essais a été comptabilisé ainsi que les temps de réponse. Le design expérimental est présenté dans la Figure 19.

Figure 19. Design expérimental de la tâche d'apprentissage d'itinéraire de l'étude 2



Tâche de reconnaissance des points de repère

Après avoir réalisé la tâche d'apprentissage d'itinéraires, les participants étaient exposés à des photos des différents points de repère présentés individuellement sur l'ordinateur en ayant pour consigne d'indiquer s'ils étaient présents ou non dans l'environnement virtuel. Au total, 24 repères ont été présentés aléatoirement dont 12 présents dans les trois itinéraires comprenant des points de repère. Les différents types de points de repère étaient présentés le même nombre de fois, soit 6 repères associatifs et 6 repères balises. Les repères distracteurs ont été choisis parmi la même base de données que les repères présents dans l'environnement virtuel ainsi que d'après les mêmes critères de sélection.

Questionnaire de fréquence des déplacements et d'usage des jeux vidéo

Le questionnaire utilisé a été créé dans le cadre de cette étude (voir Annexe 10). Le questionnaire sur la fréquence des déplacements a été réalisé en s'inspirant de celui utilisé par Armougum et al. (2019). Il s'agit d'un questionnaire en 3 questions où le participant est interrogé sur la fréquence de ses déplacements autonomes, accompagnés et déplacements nouveaux. Les réponses sont données sur une échelle de Likert en 5 points avec pour modalités de réponse « Jamais », « Quelques fois dans le mois », « Une à 3 fois par semaine », « Plus de

3 fois par semaine » et « Tous les jours ». Les réponses ont été cotées de 1 à 5 donnant un score total sur 15, où un score élevé est un indicateur d'un déplacement fréquent. Un second questionnaire a également été utilisé pour mesurer la fréquence d'utilisation des jeux vidéo. Le questionnaire utilisé a été traduit de l'étude réalisée par de Castell et al. (2019) ainsi qu'étayé d'autres exemples de jeux vidéo. Le questionnaire utilisé comportait une question sur la fréquence d'utilisation des jeux vidéo au cours des 6 derniers mois. Les modalités de réponses ont été réalisées sur la base d'une échelle de Likert en 5 points (Jamais, Rarement, Parfois, Fréquemment, Souvent). La suite du questionnaire comportait 5 autres questions ouvertes où il était demandé au participant d'estimer le nombre d'heures allouées à chaque type de jeu (jeux vidéo de tirs à la première personne, jeux vidéo de rôle, simulateurs tels que pilotage d'avion ou voiture, jeux de plateforme et/ou d'action et enfin jeux vidéo de sport).

2.3.Procédure

Les consentements écrits ont été recueillis avant le début de l'expérimentation pour l'ensemble des participants. Le recueil des données s'est déroulé en une séance de 1h30 pour les participants du groupe DT. L'expérimentation a été répartie en deux séances pour le groupe DI pour éviter l'effet de la fatigue (30 minutes puis 1h15). Les séances se sont déroulées individuellement dans une pièce calme avec les rideaux fermés afin de contrôler la luminosité de la pièce. Les participants ont réalisé lors de la première phase de l'expérience le test des Progressives Matrices de Raven'2 version papier, puis ils ont été installés face à l'ordinateur. La phase de calibration en 5 points a été réalisée, suivie de la tâche d'apprentissage d'itinéraires qui comportait 4 itinéraires (les consignes de passation sont présentées en Annexe 8 et 9). L'ordre de réalisation des itinéraires était réparti aléatoirement entre les participants. Lorsque la passation durait plus de 30 minutes, les participants étaient amenés à réaliser une pause de quelques minutes après avoir réalisé les deux premiers itinéraires. Une fois la tâche d'apprentissage finie, les participants réalisaient la tâche de reconnaissance des points de repère puis répondaient au questionnaire de fréquence des déplacements et d'utilisation des jeux vidéo. À la fin de l'expérimentation, les participants disposaient d'un temps d'échange avec l'expérimentateur. Une illustration de la salle de passation est présentée en Figure 20.

Figure 20. Illustration de la disposition de la salle de passation



3. Résultats

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel *Jamovi* version 2.2 (*The jamovi project*, 2021). Nous avons testé la normalité des distributions à l'aide du test du Shapiro-Wilk. L'hypothèse de normalité des distributions n'étant pas respectée pour l'ensemble des variables, nous avons réalisé des analyses non paramétriques. Nous avons réalisé un test U de Mann-Whitney pour les comparaisons inter-groupes, un test de Wilcoxon pour les comparaisons intragroupes ainsi qu'une ANOVA de Friedman pour évaluer l'effet du type d'itinéraire. Les comparaisons multiples ont été réalisées à l'aide du test de Durbin-Conover avec un ajustement des p-values selon la méthode de Holm.

3.1. Tâche d'apprentissage d'itinéraires

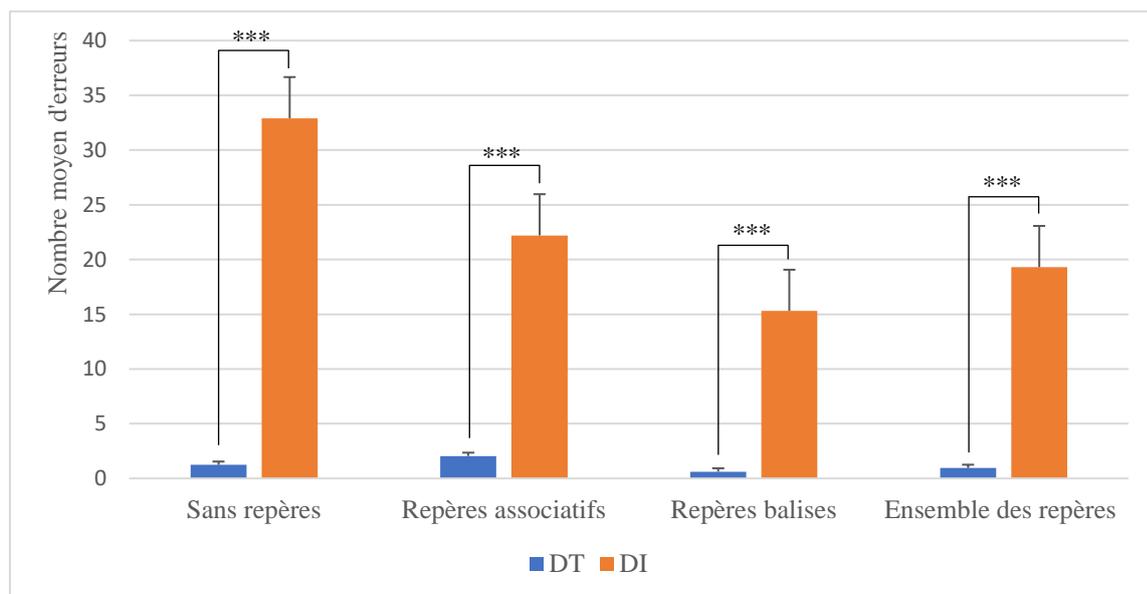
Afin d'évaluer les différences de réussite entre les groupes à la tâche d'apprentissage d'itinéraires, nous avons réalisé des analyses inter-groupes sur le nombre d'erreurs et d'essais pour chacun des itinéraires. Les résultats montrent une différence significative entre les groupes concernant le nombre d'essais et d'erreurs dans l'ensemble des itinéraires. Les participants du groupe DI ont besoin de plus d'essais pour apprendre l'itinéraire, quelle que soit la condition expérimentale ($p < .001$). Concernant le nombre d'erreurs, les participants du groupe DI

effectuent en moyenne un nombre plus important d'erreurs que les DT pour l'ensemble des itinéraires ($p < .001$). Les résultats concernant le nombre d'erreurs sont présentés dans la Figure 21.

S'agissant des comparaisons intragroupes, on note un effet du type d'itinéraire sur le nombre d'erreurs réalisées pour le groupe DI ($\chi^2(3)=33$; $p < .001$). Les analyses par paires de Durbin-Conover révèlent une différence significative entre le nombre d'erreurs effectuées dans l'itinéraire sans repères et les trois autres itinéraires composés de repères ($p < .005$). Les participants du groupe DI effectuent un nombre d'erreurs plus important dans l'itinéraire sans repères. De même, les analyses révèlent une différence significative entre le nombre d'erreurs réalisées dans l'itinéraire repères balises comparées au nombre réalisé dans l'itinéraire repères associatifs ($p = .002$) et ensemble des repères ($p = .025$). Les participants font en moyenne moins d'erreurs dans l'itinéraire balises en comparaison avec les deux autres itinéraires. On n'observe pas de différence significative entre l'itinéraire repères associatifs et l'itinéraire ensemble des repères ($p = .27$).

Concernant le groupe au développement typique, on n'observe pas d'effet significatif du type d'itinéraire sur le nombre d'erreurs ($\chi^2(3)=5,35$; $p = .148$), ce qui est dû à un effet plafond.

Figure 21. Nombre d'erreurs moyen par groupe et par itinéraire



Note. *** $p < .001$.

Nous avons réalisé des analyses concernant les temps moyens de réponse (en milliseconde) des participants sur l'ensemble des essais (voir Tableau 7). Les comparaisons inter-groupes mettent en avant une différence significative dans l'ensemble des itinéraires ($p < .001$). En moyenne, les participants du groupe DI mettent un temps plus élevé pour donner leur réponse de direction.

Concernant les analyses intragroupes, on observe un effet du type d'itinéraire sur le temps moyen de réponse dans le groupe DI ($\chi^2(3)=33$; $p=.003$). Les analyses par paires montrent que les participants répondent en moyenne plus rapidement dans l'itinéraire sans repères que dans l'itinéraire repères balises ($p=.03$) et ensemble des repères ($p < .005$). De même, ils répondent plus rapidement dans l'itinéraire regroupant l'ensemble des repères en comparaison avec l'itinéraire repères associatifs ($p=.02$).

Les analyses réalisées dans le groupe DT montrent également un effet significatif du type d'itinéraire sur le temps de réponse moyen ($\chi^2(3)=10,7$; $p=.01$). Les analyses par paires réalisées avec le test de Durbin-Conover révèlent que les participants ont un temps de réponse significativement plus long durant l'itinéraire comportant l'ensemble des repères en comparaison avec l'itinéraire sans repères ($p=.005$).

Tableau 7. Temps de réponse moyen en fonction du groupe et de l'itinéraire

	Temps de réponse moyen (ms)			
	Sans repères	Repères associatifs	Repères balises	Ensemble des repères
Groupe				
DI	1601	2707	2140	2557
DT	790	912	969	1122

3.2. Tâche de reconnaissance des points de repère

Nous avons réalisé des analyses sur le nombre moyen de repères correctement reconnus lors de la tâche de reconnaissance des points de repère afin d'identifier s'il existait une différence entre

les groupes. Les comparaisons inter-groupes réalisées montrent que les participants du groupe DI reconnaissent en moyenne un nombre inférieur de repères en comparaison avec le groupe DT ($U(21,21)=138$; $p<.05$) (8,14 vs 9,71). Lorsque l'on s'intéresse au type de repère, les analyses révèlent une différence significative entre les groupes uniquement concernant les repères balises ($U(21,21)=146$; $p<.05$) (3,76 vs 4,90). La différence s'approche du seuil de significativité pour les repères associatifs ($U(21,21)=166$; $p=.08$) (4,38 vs 4,81). Il est à noter cependant que les participants du groupe DI ont un nombre plus faible de fausses reconnaissances que les participants du groupe DT ($U(21,21)=151$; $p<.05$) (0,86 vs 1,71).

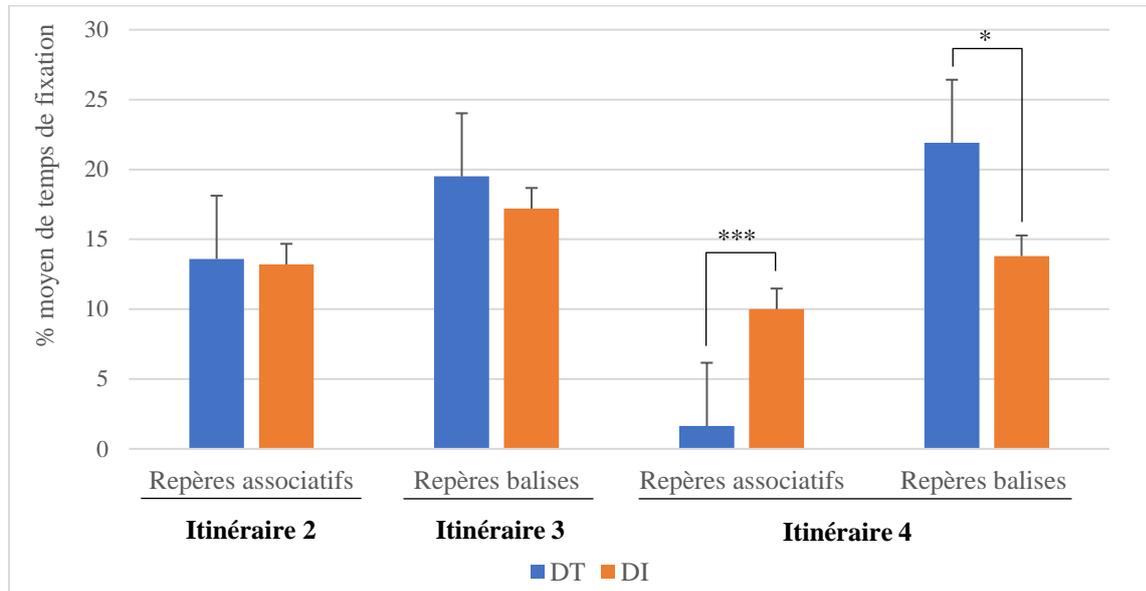
3.3. Données oculométriques

Les temps de fixations ont été traités pendant l'intervalle de temps entre l'apparition des repères et la réponse du participant. Afin de pouvoir comparer les temps de fixation entre eux, nous avons traduit les temps de fixation totaux en pourcentage de temps de fixation sur la base du temps de réponse. Ils ont été analysés selon trois zones d'intérêt : les repères associatifs, les repères balises et l'environnement. Les analyses ont été réalisées sur le premier et dernier essai pour évaluer l'effet de l'apprentissage.

Temps de fixation des points de repère

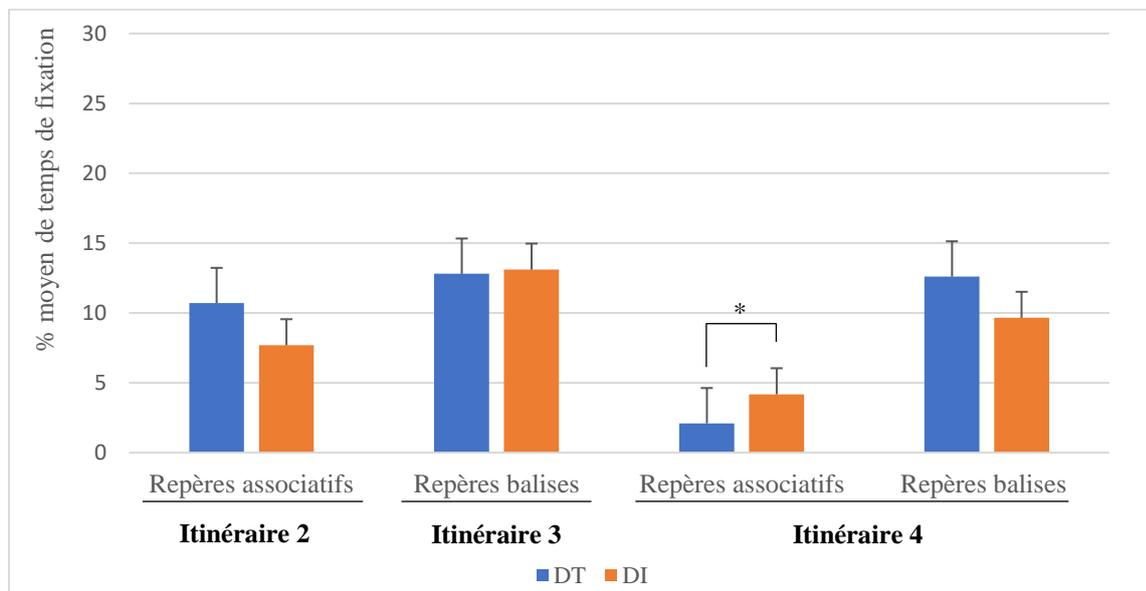
Les comparaisons inter-groupes concernant les points de repère ne montrent pas de différence significative concernant le pourcentage moyen de temps de fixation des repères dans l'itinéraire repères associatifs ($U(21,21)=214$; $p=.57$) ainsi que dans l'itinéraire repères balises ($U(21,21)=200$; $p=.31$), que ce soit lors de l'essai 1 ou lors du dernier essai (respectivement $U(21,21)=175$; $p=.13$ et $U(21,21)=217,5$; $p=.47$). Concernant l'itinéraire avec l'ensemble des repères, les analyses réalisées sur le premier essai indiquent une différence significative concernant les repères balises. En moyenne, les participants du groupe DT passent un pourcentage de temps supérieur à observer les repères balises lors de l'essai 1 ($U(21,21)=149$; $p<.05$). On n'observe pas de différence significative lors du dernier essai ($U(21,21)=182$; $p=.17$). S'agissant des repères associatifs, les analyses révèlent également une différence significative lors de l'essai 1 et du dernier essai. Les participants présentant une DI passent en moyenne un pourcentage de temps plus élevé à observer les repères associatifs lors du premier essai ($U(21,21)=90,5$; $p<.001$) ainsi que lors du dernier essai ($U(21,21)=135,5$; $p<.05$) en comparaison avec le groupe contrôle. Les résultats concernant l'essai 1 et le dernier essai sont présentés respectivement sur les Figures 22 et 23.

Figure 22. Pourcentage moyen de temps de fixation des repères en fonction des groupes et itinéraires lors du premier essai



Note. * $p < .05$. *** $p < .001$.

Figure 23. Pourcentage moyen de temps de fixation des repères en fonction des groupes et itinéraires lors du dernier essai



Note. * $p < .05$.

Pour évaluer s'il y a un effet de l'itinéraire sur le temps passé à observer les repères, nous avons réalisé des analyses intragroupes pour comparer le pourcentage de temps passé à regarder

chaque catégorie de repère entre les itinéraires pour le premier et dernier essai. Au sein du groupe DI, l'analyse de Friedman ne montre pas d'effet du type d'itinéraire pour le premier essai ($\chi^2(3)=1,29$; $p=.73$). On observe un effet significatif lors du dernier essai ($\chi^2(3)=8,52$; $p=.04$), néanmoins les comparaisons par paires après corrections ne sont pas significatives.

Au sein du groupe DT, les analyses montrent un effet du type d'itinéraire sur le temps passé à observer les repères lors de l'essai 1 ($\chi^2(3)=24,2$; $p<.001$) ainsi que lors du dernier essai ($\chi^2(3)=17,7$; $p<.005$). Les comparaisons par paires permettent de montrer que les participants observent durant moins longtemps les repères associatifs dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères plutôt que dans l'itinéraire où seulement les repères associatifs sont présents, que ce soit lors du premier ou du dernier essai ($p<.005$).

Que se passe-t-il lorsque les deux types de repère sont présents dans une même intersection ? Nous avons comparé dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères le pourcentage de temps passé à observer les repères balises avec celui passé à observer les repères associatifs pour chacun des groupes pris séparément, et ce pour le premier et le dernier essai. Les analyses réalisées auprès du groupe DI ne montrent pas de différence significative entre le temps passé à observer les repères balises et associatifs lors du premier essai ($W=129$; $p=.38$). Concernant le dernier essai, la différence s'approche du seuil de significativité ($W=113$; $p=.09$). A contrario, les analyses réalisées auprès du groupe DT montrent que les participants regardent plus longtemps les repères balises en comparaison aux repères associatifs lors du premier essai ($W=169$; $p<.001$) et du dernier essai ($W=153$; $p=.002$).

Pour évaluer l'effet de l'apprentissage sur l'observation des repères, nous avons réalisé des analyses au sein de chaque groupe comparant les temps d'observation entre le premier et dernier essai. Les analyses du groupe DI montrent que le pourcentage de temps diminue dans l'itinéraire repères balises ($W=111$; $p<.05$). De même, dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères, le pourcentage de temps passé à observer les repères associatifs diminue entre le premier et le dernier essai ($W=149$; $p=.006$). Les autres comparaisons sont non significatives. Les analyses intragroupes réalisées auprès du groupe DT montrent que les participants observent durant moins longtemps les repères dans l'itinéraire balises lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai ($W=144$; $p<.05$). De même, ils observent durant moins longtemps les repères balises dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai ($W=49$; $p<.001$). Les autres comparaisons sont non significatives.

Temps de fixation des repères balise congruents et incongruents avec la direction à emprunter

Nous avons également analysé les temps de fixations dans l'itinéraire repères balises et ensemble des repères en fonction de deux zones d'intérêts : les points de repère balises congruents et incongruents. Les repères congruents sont les repères placés sur le chemin à emprunter tandis que les repères non congruents sont placés sur le mauvais chemin. Pour les comparaisons inter-groupes, d'un point de vue descriptif, on observe bien une différence, mais les analyses statistiques sont non significatives dans les deux itinéraires, que ce soit au premier ou au dernier essai. Les participants ne se différencient donc pas sur le temps passé à observer les repères congruents ou incongruents avec la direction.

Figure 24. *Pourcentage moyen de temps de fixations des repères congruents et incongruents en fonction du groupe lors du premier essai*

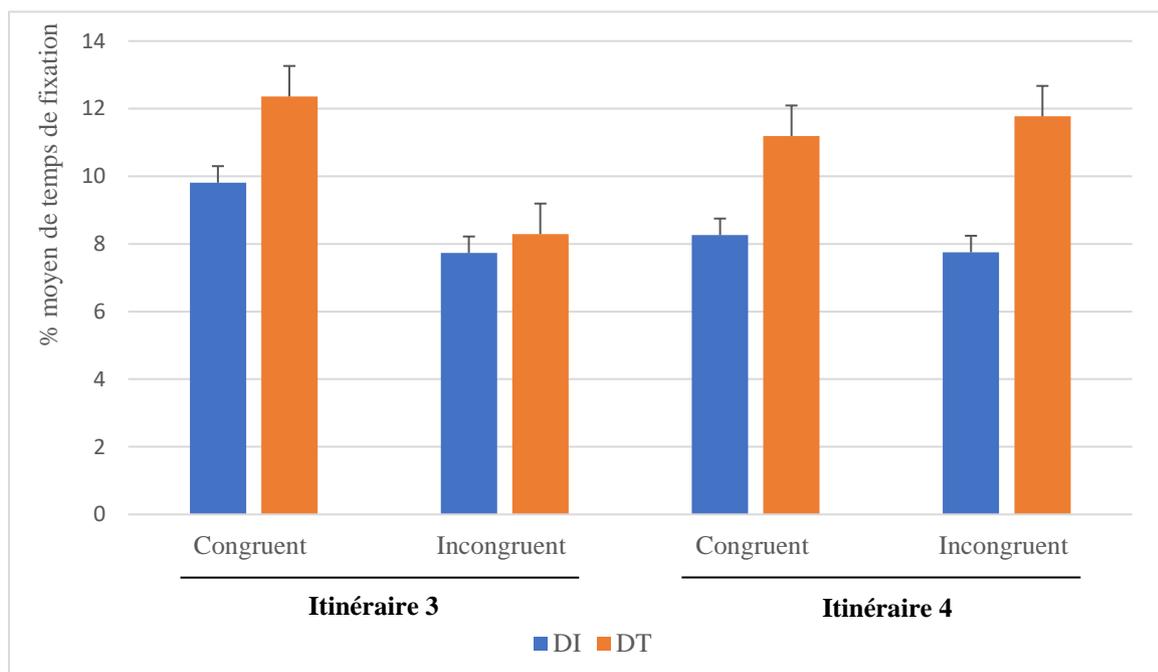
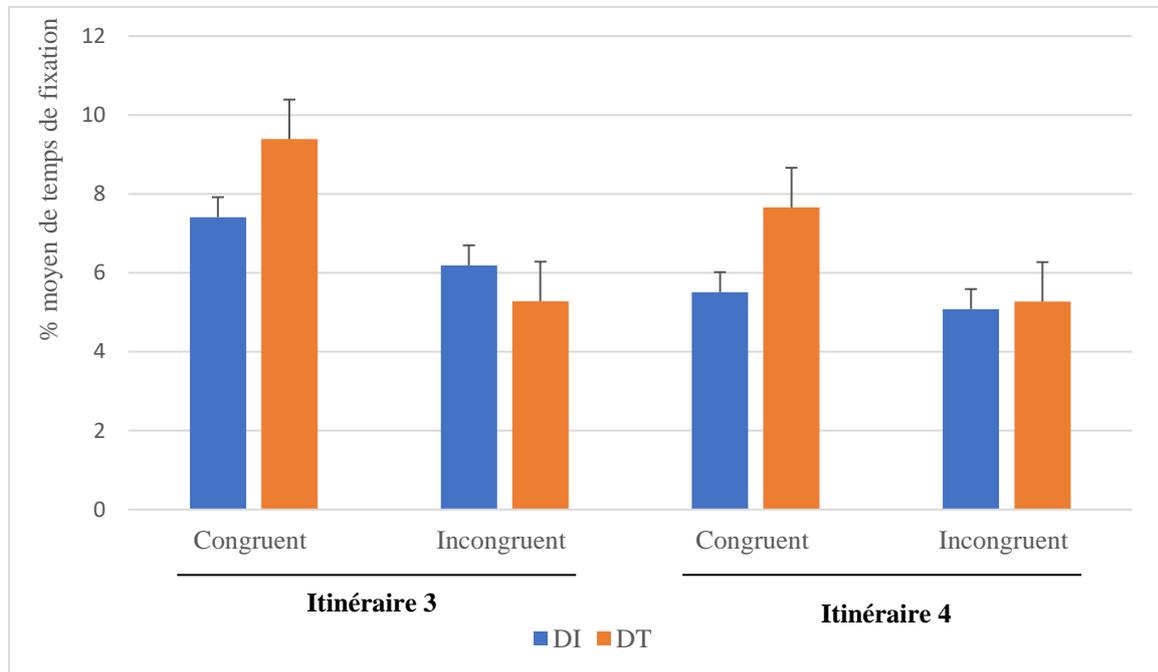


Figure 25. Pourcentage moyen de temps de fixations des repères congruents et incongruents en fonction du groupe lors du dernier essai



Concernant les analyses intragroupes réalisées au sein du groupe DI dans l'itinéraire repères balises, le temps passé à observer les repères congruents est supérieur à celui consacré aux repères incongruents, que ce soit lors du premier ($W=102$; $p<.01$) ou du dernier essai ($t(20)=1,82$; $p<.05$). Concernant l'itinéraire comprenant l'ensemble des points de repère, la différence n'est pas significative pour le premier ($t(20)=0,82$; $p=.21$) et dernier essai ($t(20)=0,60$; $p=.28$). La durée d'observation évolue-t-elle entre le premier et le dernier essai ? La différence est significative uniquement dans l'itinéraire repères balises. Les participants observent effectivement moins longtemps les repères congruents avec la direction lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai ($W=108$; $p<.05$). Concernant les repères incongruents, la diminution entre le premier et dernier essai s'approche du seuil de significativité ($W=106$; $p=.052$). Les résultats sont présentés dans la Figure 24 et 25.

Concernant les analyses intragroupes pour le groupe DT dans l'itinéraire repères balises, elles montrent que les participants passent un temps supérieur à observer les repères congruents avec la direction dans le premier ($W=114$; $p<.01$) comme dans le dernier essai ($W=146$; $p>.005$). La différence n'est pas significative pour l'itinéraire comprenant l'ensemble des points de repère lors du premier essai ($p=.35$). La différence s'approche du seuil de significativité pour le dernier essai ($p=.09$). Concernant les comparaisons entre le premier et dernier essai, il y a

des différences significatives uniquement lors de l'itinéraire comprenant l'ensemble des points de repère. Les participants regardent moins longtemps les repères congruents ($W=140$; $p<.05$) ainsi que les repères incongruents ($W=165$; $p<.001$) lors du dernier essai. Les résultats sont présentés dans la Figure 24 et 25.

Temps de fixation de l'environnement (hors points de repère)

Les comparaisons inter-groupes réalisées sur le temps passé à observer l'environnement montrent des différences entre les groupes dans les trois itinéraires. Les participants du groupe DI passent en moyenne un pourcentage de temps plus élevé à observer l'environnement lors de l'essai 1 dans l'itinéraire comprenant les repères balises (8,17% vs 3,33% ; $U(21,21)=111$; $p<.005$) ainsi que dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères (10,2% vs 4,7% ; $U(21,21)=116$; $p<.005$). C'est également le cas pour l'itinéraire repères associatifs lors du dernier essai (5,18% vs 2,21% ; $U(21,21)=129$; $p<.01$). Il n'y a pas de différence significative entre les groupes concernant les autres itinéraires et essais.

Les analyses intragroupes réalisées au sein du groupe DI indiquent un effet de l'essai sur le temps passé à observer l'environnement uniquement dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères. Le pourcentage de fixation de l'environnement est moins élevé lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai (10,2% vs 6,94% ; $W=169$; $p<.05$).

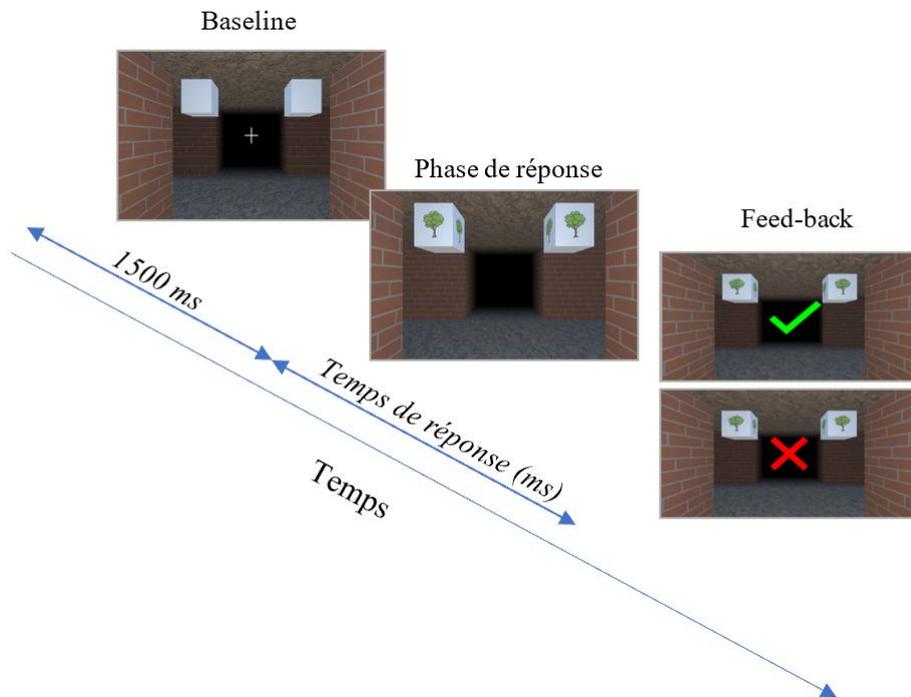
Concernant le groupe DT, les analyses montrent un effet de l'essai sur le temps passé à observer l'environnement uniquement dans l'itinéraire repères associatifs. Le pourcentage de fixation de l'environnement est moins élevé lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai (6,54% vs 2,21% ; $W=146$; $p<.001$).

Analyses de la dilatation pupillaire

Dans le but d'évaluer le niveau de charge cognitive associé à l'apprentissage des différents itinéraires, nous avons évalué pour chaque itinéraire la dilatation pupillaire pendant la phase de visionnage et les essais. Concernant la phase de visionnage de l'itinéraire, nous avons soustrait la taille moyenne de la pupille pendant les 1500 premières ms du début de la vidéo (début de l'itinéraire composé d'un couloir vide) à la taille moyenne mesurée durant le reste de la vidéo de présentation. Pour les essais, nous avons mesuré la taille moyenne de la pupille lors de la phase de masque aussi appelée *Baseline* (croix de fixation et absence de repères) ainsi que lors de la phase de réponse (de l'apparition des stimuli à la réponse du participant). Le détail des

mesures est présenté en Figure 26. Nous avons ensuite soustrait la phase de masque à la phase de réponse afin d'obtenir la dilatation pupillaire engendrée.

Figure 26. *Détail de la mesure du diamètre pupillaire pour une intersection pendant un essai*



Pour les analyses inter-groupes, une seule différence est significative. Elle concerne le dernier essai de l'itinéraire sans points de repère ($t(22)=-3,46$; $p=.002$) pendant lequel les participants du groupe DI ont une dilatation moyenne de la pupille plus faible que ceux du groupe DT. L'ensemble des valeurs sont présentées dans le Tableau 8.

Pour les analyses intragroupes, le test de Friedman réalisé sur les données du groupe DI ne rapporte pas d'effet significatif de l'itinéraire sur la dilatation pupillaire lors de la phase de visionnage. Il est de même pour groupe DT. Concernant l'effet de la répétition des essais sur la dilatation pupillaire, la seule différence significative relevée concerne le groupe DI dans l'itinéraire sans point de repère : les participants ont une dilatation pupillaire plus élevée lors du premier essai en comparaison avec le dernier essai ($t(17)=2,77$; $p<.01$).

Tableau 8. Dilatation pupillaire en fonction de l'itinéraire, de l'essai et du groupe

	Sans repères	Repères associatifs	Repères balises	Ensemble des repères
Visionnage				
DI	0,03	0,14	0,10	0,04
DT	0,08	0,31	0,18	0,16
Essai 1				
DI	0,05	-0,01	0,04	-0,01
DT	0,06	0,05	0,10	0,02
Dernier essai				
DI	-0,03	0,04	0,05	0,01
DT	0,20	0,01	0,07	0,03

Note. Les valeurs correspondent à la dilatation pupillaire en millimètres.

3.4. Analyses de corrélation

Afin d'évaluer s'il existe un lien entre les performances d'apprentissage, les durées de fixations et les autres variables (Matrices de Raven's 2, fréquence de déplacement et d'utilisation des jeux vidéo), nous avons réalisé des analyses de corrélation dans chacun des groupes pris séparément. Les données ne respectant pas le critère de normalité, nous avons réalisé des analyses de corrélation de Spearman.

Dans le groupe DI, les scores aux Matrices de Raven's 2 sont modérément corrélés négativement au nombre d'erreurs effectuées dans l'itinéraire associatif uniquement ($r=-.53$; $p=.01$). Ainsi, au plus les participants ont un score élevé aux Matrices de Raven's 2, au moins ils font d'erreurs dans l'itinéraire associatifs. Dans le groupe DT, aucune corrélation significative n'est relevée ($p>.20$). Concernant le lien entre le nombre d'erreurs et les capacités de reconnaissance des points de repère, dans le groupe DI, on note une corrélation modérée négative entre le nombre de repères correctement reconnus et le nombre d'erreurs dans l'itinéraire associatif ($r=-.63$; $p=.002$) et balise ($r=-.53$; $p=.01$). Ainsi au plus les participants reconnaissent les repères, au moins ils effectuent d'erreurs. Il est important de noter que la corrélation est non significative pour l'itinéraire composé de l'ensemble des repères ($r=-.39$; $p=.08$). Concernant le groupe DT, les corrélations sont non significatives ($p>.10$).

Afin d'identifier le lien entre le temps d'observation des repères et les erreurs, des analyses ont également été menées. Dans le groupe DI, on relève des corrélations significatives uniquement dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères. Il y a une corrélation significative négative entre le nombre d'erreurs et le pourcentage d'observation des repères balises lors du premier ($r=-.46$; $p=.04$) et dernier essai ($r=-.45$; $p=.04$). On note également une corrélation significative négative entre le nombre d'erreurs et le pourcentage d'observation des repères balises congruents au premier ($r=-.46$; $p=.04$) et dernier essai ($r=-.53$; $p=.01$). Enfin, on relève une corrélation significative négative uniquement lors du premier essai entre le nombre d'erreurs et le pourcentage d'observation des repères balises incongruents ($r=-.53$; $p=.01$). Dans le groupe DT, il y a une corrélation significative lors du premier essai entre le temps passé à observer les repères associatifs et le nombre d'erreurs dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères ($r=.49$; $p=.02$). Il n'y pas de corrélations significatives concernant le temps d'observation des autres repères, y compris les repères balises congruents et incongruents.

Concernant la fréquence des déplacements et d'utilisation des jeux vidéo, dans le groupe DI, la fréquence d'utilisation des jeux vidéo est corrélée négativement avec le nombre d'erreurs dans l'itinéraire sans repères ($r=-.47$; $p=.03$) et balise ($r=-.52$; $p=.02$). Plus les participants jouent aux jeux vidéo, moins ils font d'erreurs dans ces deux itinéraires. La fréquence des déplacements n'est pas corrélée significativement avec le nombre d'erreurs commises ($p>.05$). Les corrélations sont non significatives dans le groupe DT ($p>.05$).

4. Discussion

L'objectif de cette recherche était d'étudier l'influence des points de repère balises et associatifs sur l'apprentissage d'itinéraires auprès des personnes présentant une DI. Il était aussi question d'identifier s'il existe une différence de sélection des repères entre les personnes présentant une DI et les personnes au DT en analysant les durées des fixations oculaires. Pour ce faire, nous avons analysé les durées des fixations lors d'une tâche d'apprentissage d'itinéraires en EV où variaient différents types de points de repère. Les principaux résultats montrent que les participants du groupe DI effectuent moins d'erreurs lors de l'apprentissage de l'itinéraire composé des repères balises. Néanmoins, ils n'observent pas plus longtemps les repères balises lorsque plusieurs repères sont présents, ce qui pourrait expliquer le nombre plus élevé d'erreurs dans ce cas. Les résultats ne permettent pas de mettre en lien les erreurs réalisées dans les itinéraires avec le niveau de charge cognitive mesuré par la dilatation pupillaire.

4.1. Participants au développement typique

Concernant l'apprentissage d'itinéraires, contrairement aux résultats obtenus par Waller et Lippa (2007), nous ne relevons pas de différence significative entre l'itinéraire composé de repères balises et celui composé de repères associatifs au sein du groupe DT. Ce résultat peut s'expliquer par un effet plafond du nombre d'erreurs probablement lié au faible nombre d'intersections dans le cadre de notre expérimentation (8 intersections comparativement aux 20 intersections de l'expérience de Waller et Lippa). Cependant, les temps de réponse varient en fonction des itinéraires. Les participants mettent plus de temps à répondre lors de l'itinéraire composé de plusieurs repères (balises et associatifs) que lors de l'itinéraire sans repères. Cette différence pourrait s'expliquer par le temps nécessaire au traitement des informations visuelles ainsi que par la mise en place d'une stratégie de sélection des repères.

Nous avons enregistré les durées de fixations réalisées sur les différents repères dans les trois itinéraires. Dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères, les participants du groupe DT observent plus longtemps les repères balises en comparaison avec les repères associatifs. Ce résultat va dans le sens de nos hypothèses et s'accorde avec les résultats rapportés par Waller et Lippa (2007). En effet, ces auteurs avaient montré que les points de repère balises génèrent un nombre d'erreurs plus faible. Ainsi, nos résultats suggèrent que les personnes sont sensibles à l'aspect facilitateur de ce type de point de repère et basent ainsi préférentiellement leur orientation sur ceux-ci. De plus, dans la continuité des travaux de De Condappa et Wiener (2016) et des résultats de notre première étude, les participants du groupe DT observent davantage les repères congruents avec la direction à emprunter dans l'itinéraire balises, que ce soit lors du premier ou dernier essai. En revanche, la différence n'est pas significative dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères. Il est possible que l'absence de différence soit due au nombre élevé de repères qui aurait influencé la dispersion du regard. En effet, Phillips (2015) avait relevé une durée de fixations moyenne plus faible lorsque les participants apprenaient un itinéraire dans un environnement complexe plutôt qu'épuré en informations. Cependant, cette interprétation ne permet pas d'expliquer pour quelles raisons les participants observent les repères congruents dans l'étude 1 et non dans la condition ensemble des repères de la présente étude, alors que ces itinéraires contiennent tous deux les mêmes nombres de repères.

Comment évoluent les fixations visuelles entre le premier et le dernier essai ? Les participants du groupe DT portent bien leur attention vers les repères balises qui sont facilitateurs pour l'apprentissage, pourtant on relève une diminution du temps passé à observer ces repères dans

l'itinéraire balises ainsi que dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères. Il est possible que le processus de décision soit plus rapide pour les repères balises en lien avec une détection visuelle de plus en plus rapide des repères utilisés pour se diriger. Cette détection serait facilitée par le processus de reconnaissance sur lequel se base la navigation par balise (Waller & Lippa, 2007).

En ce qui concerne la charge cognitive, contrairement à nos hypothèses, il n'y a pas de différence de dilatation pupillaire entre les itinéraires au sein du groupe DT. Nous avons formulé cette hypothèse en lien avec les travaux qui montrent une augmentation de la dilatation pupillaire en lien avec la difficulté de la tâche (Brouwer et al., 2014; Maier et al., 2019). Cependant, les participants du groupe DT effectuent un nombre très faible d'erreurs dans l'ensemble des itinéraires et il n'y a pas de différences du nombre d'erreurs entre les itinéraires. Ces résultats qui indiquent un faible niveau de difficulté de la tâche expliqueraient que le niveau de charge cognitive ne diffère pas entre les différents itinéraires. Il serait nécessaire de reproduire cette étude en augmentant le nombre d'intersections afin d'évaluer l'effet des différents points de repère sur la charge cognitive. Il est néanmoins important de souligner que si une augmentation du nombre d'intersections diminuait l'effet plafond présent dans le groupe DT, il créerait potentiellement un effet plafond dans le groupe DI.

4.2. Participants présentant une déficience intellectuelle

Les participants avec une DI font plus d'erreurs dans l'itinéraire sans points de repère en comparaison avec les trois autres itinéraires. Ce résultat va dans le sens de celui observé par Broadbent et al. (2015) auprès de personnes avec un syndrome de Williams. Dans leur étude, les participants commettaient trois fois plus d'erreurs lorsque les repères étaient absents. Concernant les différences entre les itinéraires composés de repères, le nombre d'erreurs est plus faible dans l'itinéraire comprenant les repères balises en comparaison avec l'itinéraire où figurent les repères associatifs et l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères. Ce résultat atteste de l'effet facilitateur des balises dans cette population aussi. Il se comprend bien au regard du traitement cognitif impliqué dans la navigation par les balises. On sait effectivement que les processus de reconnaissance visuelle sont plutôt fonctionnels chez les personnes présentant une DI (Carlin et al., 2001; Lifshitz et al., 2011).

Les temps de réponse des participants se différencient en fonction de l'itinéraire. Les personnes répondent plus rapidement lorsqu'aucun repère n'est présent plutôt que lorsque les repères balises ou l'ensemble des repères sont présents. Tout comme pour le groupe DT, il est possible

que cette différence soit le reflet du temps de traitement de l'information nécessaire lorsque les repères sont présents. Néanmoins, en croisant ce résultat avec le nombre d'erreurs, il est également possible que cela soit dû à des réponses données au hasard dans la condition sans repères.

Les analyses corrélationnelles fournissent aussi quelques résultats intéressants. Ainsi, le nombre d'erreurs réalisées dans les itinéraires est lié négativement aux repères correctement reconnus dans l'itinéraire balise et associatifs. Ces résultats mettent en lumière le lien entre les capacités de mémorisation et les performances d'apprentissage d'itinéraires (M. Davis et al., 2014). De surcroît, on relève également un lien entre la fréquence d'utilisation des jeux vidéo et les erreurs commises dans deux itinéraires (sans repères et balise). L'utilisation des jeux vidéo est ainsi liée à un nombre d'erreurs plus faible. Plusieurs causes explicatives peuvent être évoquées. D'une part, comme énoncé dans la littérature, l'usage fréquent des jeux vidéo (impliquant la navigation spatiale) peut mener à une utilisation de meilleures stratégies de navigation (Murias et al., 2016) ainsi qu'être lié à un meilleur traitement de l'information (Powers et al., 2013). D'autre part, il est également possible que la familiarité avec les outils numériques et jeux vidéo ait facilité la compréhension de la tâche et la saisie des réponses en lien avec les habiletés motrices impliquées (Borecki et al., 2013).

Pour ce qui concerne les données oculométriques, les participants n'observent pas significativement plus longtemps les repères balises dans l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères. Dans la continuité de ce que nous avons pu observer dans la première étude, nous obtenons cependant une tendance à l'amélioration au fil des essais qui s'exprime par une durée plus longue d'observation des repères balises comparativement aux repères associatifs. En revanche, dans l'itinéraire comprenant uniquement des balises, les participants avec DI observent davantage les repères congruents avec la direction à emprunter, comme le font nos participants du groupe DT. On remarquera cependant que cet effet ne concerne pas l'itinéraire comprenant l'ensemble des repères, ce qui ne confirme pas les conclusions de la première étude dans laquelle les participants avec une DI observaient davantage les repères balises congruents uniquement lors du dernier essai. Ainsi, dans la condition où seuls les points de repère balises sont disponibles, les participants avec DI focalisent spontanément leur attention sur le repère congruent, et ce dès le premier essai. En revanche, lorsque les points de repère sont plus nombreux, cette sélection n'est pas évidente (itinéraire comprenant l'ensemble des repères) ou elle met plus de temps à se mettre en place (étude 1). Notons enfin que les durées d'observation des repères dans les itinéraires balises et associatifs diminuent entre le premier et le dernier

essai, ce qui est probablement le signe d'une détection visuelle de plus en plus rapide des repères utilisés pour se diriger, comme pour le groupe DT.

Concernant le niveau de charge cognitive, contrairement aux hypothèses formulées, il n'y a pas de différence de dilatation pupillaire entre les itinéraires. Ces résultats vont à l'encontre de l'étude menée par Angulo-Chavira et al. (2017) auprès de personnes présentant une trisomie 21. Ces auteurs mettaient en avant une augmentation du diamètre pupillaire avec la difficulté de la tâche. Or, contrairement à ce que nous avons relevé pour le groupe DT, le nombre d'erreurs indique bien que certaines conditions sont plus difficiles que d'autres, mais cette difficulté ne s'est pas traduite par une variation dans la dilatation pupillaire. Ces résultats pourraient s'expliquer par l'investissement cognitif dans la tâche en lien avec sa difficulté (Johnson et al., 2014). Les personnes avec DI auraient ainsi désinvesti les conditions les plus difficiles, comme la condition sans point de repère.

4.3. Comparaison entre les deux groupes de participants

Au sujet des capacités d'apprentissage d'itinéraires, les résultats vont dans le sens des précédentes études. Dans l'ensemble des itinéraires, les participants du groupe DI ont besoin de plus d'essais pour apprendre l'itinéraire et commettent un nombre beaucoup plus important d'erreurs (Courbois, Farran, et al., 2013; Mengue-Topio et al., 2011). De même, les participants avec une DI mettent un temps plus élevé pour répondre en comparaison avec les participants du groupe DT.

Nous avons émis l'hypothèse que les participants du groupe DI observeraient durant un pourcentage de temps plus faible les repères que les participants du groupe DT. Cette hypothèse n'a pas été confirmée, car on ne constate pas de différence significative entre les deux groupes concernant le temps passé à observer les repères dans l'itinéraire balises ainsi que l'itinéraire associatifs. Ainsi, dans des environnements simples, qui comportent peu d'informations, les personnes présentant une DI ne semblent pas se différencier fondamentalement des typiques en matière d'allocation de l'attention. Cependant, si les deux groupes ne se distinguent pas en termes de pourcentage de temps consacré à l'observation des repères, le nombre d'erreurs est quant à lui bien différent entre les deux groupes dans ces deux conditions. Cela montre bien qu'au-delà de la prise d'information visuelle, d'autres facteurs interviennent pour déterminer la différence entre les groupes (mémorisation, fonctions exécutives, voir par exemple Purser et al., 2015). Pour les personnes avec DI, mieux observer les repères aidants pour les déplacements

permet de diminuer le nombre d'erreurs, mais ne permet pas d'apprendre un itinéraire aussi efficacement que les personnes avec un développement typique.

Les résultats issus de l'itinéraire avec l'ensemble des points de repère sont particulièrement intéressants. On remarque effectivement que les participants au développement typique ont un pourcentage de temps consacré à l'observation de balises supérieur à celui des participants avec DI (premier essai), alors que l'inverse se produit pour l'observation des repères associatifs ($DI > DT$, premier et dernier essai). Ainsi, si les repères balises permettent aux personnes avec une DI d'apprendre en faisant moins d'erreurs (voir la comparaison entre itinéraires balises et itinéraire associatifs), elles observent cependant durant moins longtemps ce type de repère comparativement aux participants DT. Inversement, le recours aux repères associatifs se traduit par un nombre d'erreurs plus élevé, mais elles les regardent proportionnellement plus longtemps que les personnes DT. On remarquera que la différence entre les deux groupes concernant les repères balises n'est plus significative au dernier essai, ce qui pourrait être la conséquence d'un effet d'apprentissage chez les participants avec DI, comme nous avons pu l'observer dans la première étude. Un élément important à mentionner est que dans l'ensemble des essais de cette condition expérimentale, les repères associatifs étaient placés au premier plan et les repères balises au second plan. Mis en relation avec le concept de saillance structurelle, cette propriété peut suggérer l'existence d'un critère de sélection différent dans les deux groupes. Effectivement, les repères situés au premier plan sont aussi ceux qui sont les plus utilisés par les individus lorsqu'ils tournent à droite ou gauche (Röser et al., 2012). Les personnes avec une DI se réfèreraient ainsi davantage à la saillance structurelle pour sélectionner les repères, tandis que les personnes au développement typique seraient capables de dépasser cette information pour se baser sur la stratégie d'apprentissage la plus efficace. D'autres études faisant varier systématiquement le placement des repères balises et associatifs seraient utiles pour isoler l'influence de la saillance structurelle.

Concernant la charge cognitive, nous avons émis l'hypothèse d'une dilatation pupillaire plus importante dans le groupe DI traduisant un niveau de charge cognitive plus important que les participants du groupe DT. Les résultats obtenus ne permettent pas de confirmer cette hypothèse étant donné que peu de différences sont relevées entre les groupes et ce quel que soit le type d'itinéraire. Comme énoncé précédemment, il est possible que la difficulté de la tâche ait influencé les résultats. D'autres études se concentrant spécifiquement sur la dilatation pupillaire en situation d'apprentissage d'itinéraires seraient nécessaires pour éclaircir ce point.

Cette étude comporte certaines limites. Le paradigme utilisé dans la présente étude ne permet pas de contrôler le recours à une stratégie en ordre sériel. En effet, De Condappa et Wiener (2016) ont dans le cadre de leur expérience montré des intersections se présentant dans un ordre aléatoire, ce qui empêchait le recours à cette stratégie. Cependant, nous avons tout de même conservé ce paradigme, celui-ci étant davantage en adéquation avec une situation d'apprentissage de route en condition écologique.

La présence plus élevée d'hommes dans l'échantillon a également pu influencer les résultats. Il a été démontré que les femmes ont davantage tendance à observer les points de repère lors de leurs déplacements en comparaison avec les hommes (Andersen et al., 2012). Ainsi, un échantillon contenant plus de femmes aurait amené à une observation potentiellement plus élevée des repères.

5. Conclusion

En conclusion, les personnes avec une DI font moins d'erreurs de direction lorsqu'ils s'appuient sur les repères balises pour s'orienter. Il s'agit de la première étude qui montre l'influence positive des repères balises auprès de cette population. Au niveau des durées de fixations, lorsqu'un seul type de repère est présent, les personnes présentant une DI observent les repères durant un pourcentage de temps similaire au groupe DT. On relève aussi dans cette situation que les personnes avec une DI observent durant plus de temps les repères balises congruents avec la direction à emprunter, tout comme les participants du groupe DT. Lorsque plusieurs types de repères sont présents, les personnes présentant une DI observent durant moins longtemps les repères balises que les personnes DT, alors qu'il s'agit de ceux qui facilitent le plus leur apprentissage. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que les difficultés de mémorisation d'itinéraires présentes chez les personnes avec une DI seraient entre autres liées à une sélection peu judicieuse du type de repère lorsque les informations visuelles sont riches, ce qui complète les résultats rapportés par Courbois et al. (2012).

Points importants de la seconde étude :

- L'itinéraire uniquement composé de balises est plus facile à apprendre pour les personnes avec une DI.
- Quand un itinéraire est uniquement composé de balises, les personnes avec DI regardent autant de temps les repères que les personnes DT, pour autant elles font plus d'erreurs.
- Lorsque l'itinéraire n'est composé que de balises, les personnes avec DI se comportent comme les personnes DT en mettant en place une stratégie adaptée de sélection des points de repère dès le premier essai (attention visuelle plus importante accordée aux repères congruents).
- Dans les itinéraires plus complexes, composés à la fois de repères balises et associatifs, les participants du groupe DT focalisent préférentiellement leur attention vers les repères balises. Cette stratégie ne semble pas être mise en œuvre chez les personnes avec DI, bien que les résultats évoluent dans ce sens en fin d'apprentissage.

CHAPITRE 6 :
L'INFLUENCE DE LA SAILLANCE PERCEPTIVE SUR
L'OBSERVATION DES POINTS DE REPÈRE AUPRÈS DES
PERSONNES PRÉSENTANT UNE DÉFICIENCE
INTELLECTUELLE (ÉTUDE 3)

1. Objectif de l'étude et hypothèses de recherche

Dans l'environnement urbain, de nombreux éléments peuvent être utilisés comme points de repère. Chaque repère du fait de ses caractéristiques (lieu, taille ou unicité) et la manière dont il est utilisé peut induire une stratégie d'orientation différente. Les études précédentes ont permis de montrer que certains repères (notamment balises) permettent aux personnes avec une DI d'apprendre plus facilement les itinéraires. De même, lorsque ces repères sont uniquement présents, le temps d'observation qui leur est dédié est le même que les participants aient ou non une DI. La situation change radicalement, lorsque plusieurs repères sont introduits. La sélection des repères aidants est alors difficilement mise en place par les personnes avec une DI. Par ailleurs, il faut aussi souligner que l'environnement peut perturber le processus d'apprentissage en attirant l'attention des personnes vers des zones dénuées d'informations. Ainsi, la première expérience de la thèse a permis de montrer qu'en comparaison avec les personnes avec un DT, un temps important était dédié à l'observation de l'environnement alors qu'il ne comportait pas de repères ou indications pour aider à l'orientation. L'ensemble de ces résultats laisse à penser qu'il existe une certaine difficulté dans le traitement visuel de l'environnement et dans la sélection des repères pertinents. De nombreuses causes explicatives aussi bien stratégiques (*top-down*) qu'environnementales (*bottom-up*) peuvent être évoquées (non-identification de l'utilité du repère, difficulté à focaliser l'attention sur un élément, critères de sélection différents, etc.). Néanmoins, dans la continuité des recherches réalisées, il semble judicieux de s'intéresser à la sélection des repères sous l'angle des propriétés de saillance. Mieux connaître l'implication de la saillance dans les capacités de sélection et de mémorisation permettrait d'ajuster les systèmes d'aide à la navigation (voir l'environnement urbain) aux stratégies utilisées par les personnes avec une DI lors de leurs déplacements.

D'après Caduff et Timpf (2008) la sélection des points de repère s'opère selon trois types de saillance : perceptive, cognitive et contextuelle. La saillance perceptive réfère aux caractéristiques physiques des repères, notamment la position de l'objet, l'objet lui-même et l'environnement. Il s'agit du contraste de l'objet par rapport à l'environnement. Ce concept est analogue à celui de saillance visuelle qui est régi par des processus de bas niveau (*bottom-up*). L'attention visuelle est ainsi influencée automatiquement par les caractéristiques de l'environnement et non la tâche (Itti & Koch, 2000).

La saillance cognitive quant à elle réfère au vécu qu'entretient l'individu avec l'objet. Ce mécanisme est régi par un processus de haut niveau (*top-down*) qui dépend de la familiarité

qu'entretient la personne avec le point de repère. La saillance cognitive englobe la notion de saillance sémantique qui réfère à la connaissance du repère, l'importance culturelle et historique de celui-ci (Raubal & Winter, 2002).

Enfin, la saillance contextuelle (aussi appelée structurelle) fait référence à la position du repère et la structure de l'environnement, en lien avec l'objectif de la tâche ainsi que la modalité d'exécution de la tâche (déplacement en voiture ou piéton). Elle est liée à des traitements cognitifs de haut niveau, car il s'agit pour l'individu, par exemple, de choisir un repère en lien avec son objectif de déplacement (préférer un repère à droite s'il tourne à droite) (Klippel & Winter, 2005).

De nombreux travaux ont montré l'influence de la saillance sur la sélection et la mémorisation des points de repère (pour revue, voir Yesiltepe et al., 2021). La présente étude s'inspire du design expérimental de l'étude de Grzeschik et al. (2019) menée auprès de participants jeunes et âgés pour évaluer l'influence de la saillance perceptive sur la sélection des repères et l'apprentissage de directions. L'expérience était composée d'une tâche en environnement virtuel où les participants apprenaient des itinéraires formés de 4 intersections comprenant chacune un repère unique ou non unique. Le repère unique était présenté à une seule reprise tandis que le repère non unique était présenté à deux reprises, ce qui en faisait une information non-aidante pour l'apprentissage. Les auteurs ont fait varier la saillance perceptive des repères selon deux conditions : une où les repères uniques (aidants) étaient saillants et une où les repères non uniques (non-aidants) étaient saillants. Pour étudier la sélection des repères, les auteurs ont analysé les temps d'observation des points de repère à l'aide d'un dispositif d'*eye-tracking* permettant de capturer en temps réel les mouvements oculaires des participants (Baccino, 2002). Les résultats ont montré que les participants (jeunes et âgés) observaient davantage les repères saillants perceptivement lors de la première rencontre qui correspond au moment où les participants ne peuvent pas savoir si le repère est unique ou non. Lors de la condition où les repères non uniques sont saillants, les participants des deux groupes parviennent lors de la seconde rencontre, à réorienter leur attention sur les repères uniques (aidants) non saillants. Ce processus correspond aux capacités de désengagement attentionnel. Ainsi, ces auteurs ont montré que si la saillance perceptive du repère est la première dimension qui attire l'attention, l'unicité du point de repère déterminera davantage la durée totale d'observation, et ce indépendamment de la saillance perceptive de l'objet.

Les personnes présentant une DI ont certains déficits des processus cognitifs qui peuvent impacter leur sensibilité aux différentes formes de saillances. Il est avancé qu'elles auraient une

altération des processus attentionnels de haut et de bas niveau, avec un déficit plus important des processus de haut niveau (J. Kim et al., 2021). Plus précisément, le fonctionnement atypique du système visuel engendrerait des difficultés dans la construction d'une carte de saillance interne (Boot et al., 2012), le processus de désengagement attentionnel (Lense et al., 2011), mais également l'orientation de l'attention en lien avec l'objectif d'une tâche (J. Kim et al., 2021). Les difficultés de sélection des points de repère des personnes avec une DI pourraient ainsi être, en partie, expliquées par ces processus attentionnels. En ce sens, N'Kaoua et al. (2019) ont montré que l'utilisation de repères mis en surbrillance, donc majorés en matière de saillance perceptive, améliorerait les capacités de déplacement des personnes avec une DI. Néanmoins, si cette recherche montre une amélioration de l'apprentissage, elle ne permet pas d'étudier l'influence de la saillance perceptive sur la sélection des repères. De même, l'influence des trois types de saillances sur la sélection des points de repère et la charge cognitive associée à l'apprentissage n'ont pas encore été étudiées auprès des personnes avec une DI. Ces questions sont pourtant essentielles pour comprendre les difficultés de déplacement ainsi que concevoir des systèmes d'aide à la navigation adaptés à la déficience intellectuelle.

L'objectif de cette étude est de mesurer l'impact de la saillance perceptive des points de repère sur leur sélection et la charge cognitive associée à l'apprentissage d'itinéraires auprès des personnes avec une déficience intellectuelle. Pour ce faire, la tâche expérimentale de Grzeschik et al. (2019) a été répliquée et adaptée aux capacités d'apprentissage des personnes avec une DI. Les participants devaient lors d'une tâche en EV apprendre 6 itinéraires composés de 4 intersections chacun. Chaque intersection comprenait un repère unique et un repère non unique. Les itinéraires variaient selon deux conditions : les routes aidantes et les routes non-aidantes. Les routes aidantes étaient composées de repères uniques saillants et repères non uniques non saillants. Les routes non-aidantes comprenaient des repères non uniques saillants et des repères uniques non saillants. Les participants disposaient de 5 essais par itinéraire.

Au vu du caractère facilitant offert par la saillance perceptive, nous nous attendons à ce que les routes aidantes soient mieux apprises par les deux groupes. En lien avec les difficultés de désengagement attentionnel présentes chez les personnes avec une DI, il est possible que cet effet soit plus important au sein de ce groupe en comparaison avec le groupe DT.

Concernant l'observation des repères saillants visuellement, nous faisons l'hypothèse qu'ils seront davantage observés par les deux groupes en comparaison avec les repères non saillants comme cela a été souligné par Grzeschik et al. (2019). Cette hypothèse s'appuie également sur les résultats soulevés par Carlin et al. (2003), N'Kaoua et al. (2019) et par l'étude 1 de la thèse

qui laissent à penser que les capacités de traitement visuel basées sur la saillance perceptive (notamment couleur et contraste) sont préservées chez les personnes avec une DI.

Dans la continuité des résultats obtenus par Grzeschik et al. (2019), nous nous attendons à ce que les participants du groupe DT diminuent le temps passé à observer les repères non uniques entre la première et seconde rencontre, et ce dès la phase de visionnage et le premier essai. Concernant les participants du groupe DI, en lien avec les résultats obtenus par Courbois et al. (2012), nous ne nous attendons pas à relever de différence entre la première et seconde rencontre lors de la phase de visionnage et du premier essai. Cependant, en lien avec les résultats des deux précédentes études de thèse sur l'effet bénéfique de la répétition des essais (apprentissage), nous nous attendons à une diminution du temps passé à observer les repères non uniques au fil des essais ainsi qu'à une augmentation du temps passé à observer les repères uniques.

Au sujet de la dilatation pupillaire, nous nous attendons dans les deux groupes à une dilatation pupillaire plus importante lors de l'apprentissage des routes non-aidantes, en comparaison avec les routes aidantes (effet de la difficulté de la tâche). De même, en lien avec la différence d'apprentissage (nombre d'erreurs et d'essais) attendue entre les deux groupes, nous nous attendons à une dilatation pupillaire plus élevée dans le groupe DI en comparaison avec le groupe DT, qui est peut-être davantage sujet à un effet plafond dans cette tâche. Pour conclure, l'effet de la répétition des essais pouvant avoir un effet d'apprentissage, mais aussi de diminution des ressources attentionnelles et/ou motivationnelles qui varie entre chaque groupe et participant, nous nous attendons : (1) dans le groupe DI, à une diminution de la dilatation pupillaire au fil des essais en lien avec l'apprentissage de l'itinéraire ; (2) dans le groupe DT, à ne pas relever de différence de dilatation pupillaire entre les essais, en raison du faible niveau de difficulté de la tâche.

2. Méthodologie

2.1. Participants

Dans le cadre de cette étude, deux groupes de participants ont été recrutés. Le premier groupe est composé de 26 participants (9 femmes et 17 hommes) présentant une déficience intellectuelle légère. Les participants en moyenne âgés de 29,44 ans ont été recrutés au sein de plusieurs structures (Établissements et services d'aide par le travail, foyers d'accueil médicalisés, foyers d'hébergement). Les participants ont été recrutés d'après un diagnostic de

déficience intellectuelle légère non associée à une étiologie génétique. Le second groupe est composé de 31 participants (16 femmes et 15 hommes) au développement typique recrutés sur le Campus Universitaire âgés en moyenne de 22,63 ans. Les participants des deux groupes ont été recrutés d'après un critère d'âge compris entre 18 et 40 ans ainsi que sur l'absence de troubles oculaires. La présentation de l'étude ainsi que les formulaires de consentement ont été rédigés en format classique et en langage simplifié pour le groupe de personnes présentant une DI (voir Annexe 12 et 13). Pour les personnes du groupe DI, l'étude a été présentée lors d'un entretien individuel. Pour les deux groupes, les accords de consentement ont été recueillis dans un délai minimum d'une semaine après la présentation de l'étude. Cette étude a fait l'objet d'une validation par le comité d'éthique et de recherche de l'université de Lille sous la référence : 2022-611-S107. Les données descriptives concernant l'âge ainsi que les scores aux Progressives Matrices de Raven's 2 des participants sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9. Âges et scores des participants aux Matrices de Raven's 2

	Moyenne	Écart-type	Étendue
Âge (années;mois)			
DT (n=31)	22,63	4,01	19,25-34,25
DI (n=26)	29,44	6,74	20,17-40,83
Score aux Matrices ¹			
DT	97,45	16,75	73-142
DI	65,27	9,07	48-92

*Note.*¹Note standard aux Matrices de Raven's 2.

2.2. Matériel

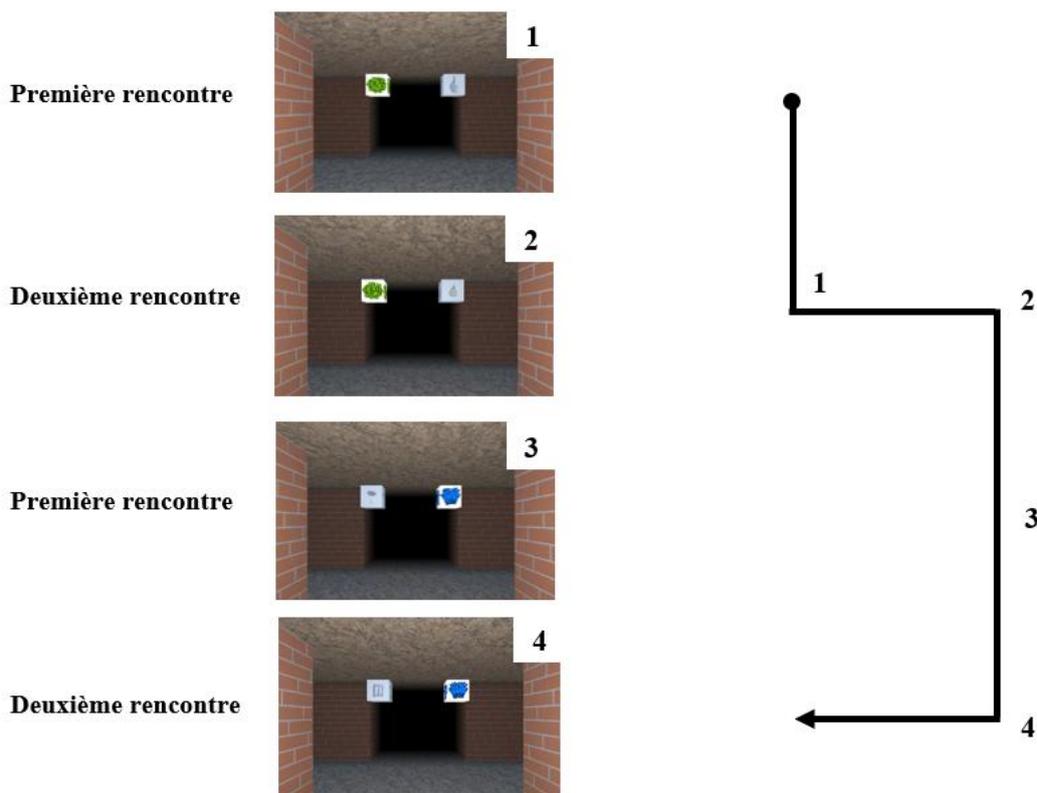
Environnements virtuels

L'environnement virtuel a été conçu sur le logiciel *UNITY*[®] et présenté sur un ordinateur portable de 17 pouces d'une résolution de 1920x1080 pixels. L'environnement était sous forme de murs en briques rouges avec le sol et le plafond d'une teinte grise. Le design expérimental a

été inspiré de l'expérience réalisée par Grzeschik et al. (2019). Il était composé de 6 itinéraires comprenant 4 intersections chacun. Chaque intersection comprenait un repère unique, présent à une seule reprise, et un repère non unique, présent à deux reprises. Les participants rencontraient les repères non uniques à deux reprises appelées « première rencontre » et « deuxième rencontre ». Ainsi, chaque itinéraire était composé de deux premières rencontres et de deux secondes rencontres pour les repères non uniques.

Parmi les 6 itinéraires, deux types de routes étaient présentées : les routes aidantes et les routes non-aidantes. Lors des routes aidantes, le repère unique était saillant tandis que le non unique était non saillant. Lors des routes non-aidantes, le repère non unique était saillant et le repère unique non saillant. Un exemple d'itinéraire est présenté en Figure 27.

Figure 27. Exemple d'un itinéraire de type « non-aidant », inspiré de la figure de Grzeschik et al. (2019)



Pour l'ensemble des itinéraires, le placement des repères uniques et/ou saillants a été conçu en tenant compte de la congruence du repère avec la direction correcte à emprunter. La position des repères a été contrebalancée et répartie le plus aléatoirement possible, dans la limite des combinaisons d'itinéraires possibles. Sur les 24 intersections présentées, les repères saillants

et/ou uniques étaient 10 à 11 fois congruents avec la direction. Pour chaque itinéraire (comportant 4 intersections), les repères saillants et/ou uniques étaient positionnés 1 à 3 fois sur le chemin correct. Les intersections et itinéraires ont également été présentés dans un ordre aléatoire, comme détaillé plus bas dans la partie relative à la tâche d'apprentissage.

Les points de repère utilisés pour le design de l'EV sont issus de la base d'image IMABASE (Bonin et al., 2020) et sélectionnés d'après un critère de familiarité et d'accord d'image pour qu'ils soient identiques sur le plan de la saillance sémantique. Ils ont été modifiés pour paraître saillants ou non saillants visuellement via le logiciel Paint 3D (Microsoft Corporation, 2022) et accentués avec l'environnement du logiciel *UNITY*[®]. La saillance perceptive des points de repère a été mesurée pour chaque intersection via le logiciel MATLAB grâce à la technique de « *Graph-Based Visual Saliency* » (Harel et al., 2007) (voir Figure 28). Lorsque la saillance perceptive n'était pas suffisamment élevée, les repères ont été modifiés ou remplacés pour qu'ils respectent les conditions d'après le principe du « *Winner take all* »¹.

Figure 28. Aperçu d'une intersection et de la carte de saillance



Image originale



Carte de saillance

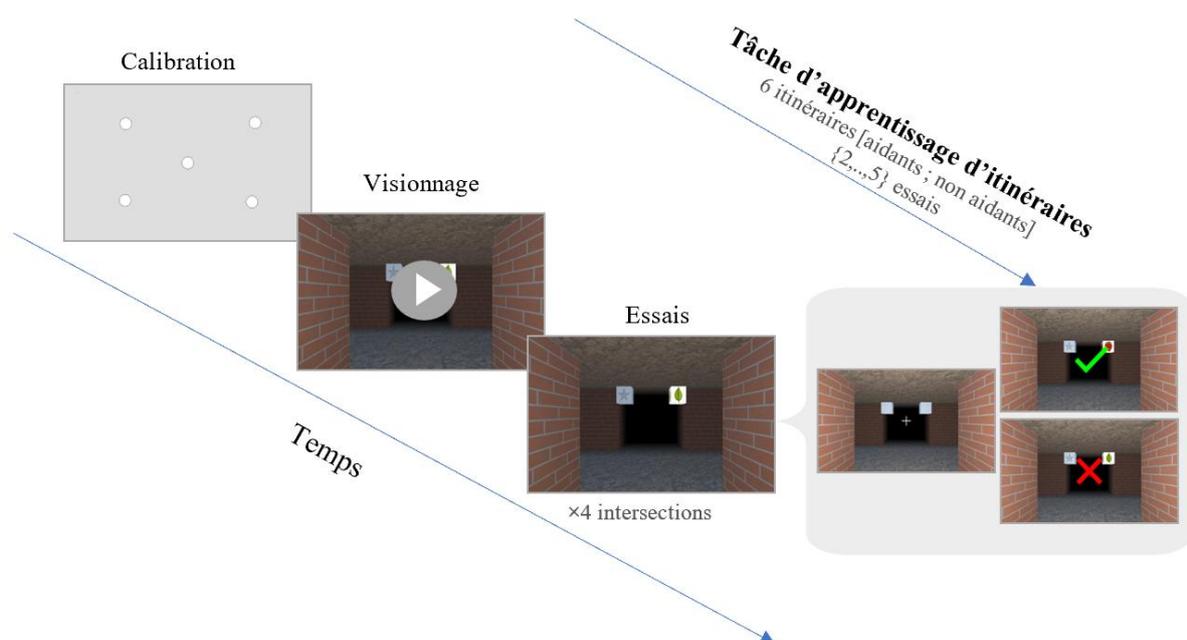
Tâche d'apprentissage d'itinéraires

Lors de la phase d'apprentissage d'itinéraires, les participants ont dans un premier temps observé une vidéo du chemin correct en étant transportés passivement dans l'environnement. Dans un second temps, la phase de test a débuté durant laquelle les participants ont été exposés à des captures d'écran d'intersections dans un ordre aléatoire (conformément à la procédure expérimentale de Grzeschik et al. 2019). La présentation des intersections dans un ordre

¹ Mécanisme de compétition entre les neurones menant à sélectionner un seul élément (le gagnant) sur la carte (Itti et al., 1998).

aléatoire permet d'éviter les effets liés à l'apprentissage implicite des séquences. Avant chaque phase de réponse, une intersection sans points de repère avec une croix de fixation au centre était présentée pendant 1500 ms (mesure de base). Lors de la phase de réponse, les participants indiquaient la direction à l'aide des flèches du clavier (droite, gauche ou tout droit). Un feedback visuel était donné après chaque réponse (coche verte ou croix rouge). Pour valider un itinéraire, le participant devait le réaliser sans erreurs deux fois consécutives. Il disposait de 5 essais pour chaque itinéraire. Le nombre d'erreurs, le nombre d'essais ainsi que les temps de réponse ont été enregistrés. Les itinéraires ont été présentés aux participants dans un ordre aléatoire. Le design expérimental est illustré dans la Figure 29.

Figure 29. Design expérimental de la tâche d'apprentissage d'itinéraires de l'étude 3



Données oculaires

Les données oculaires ont été enregistrées à une fréquence de 120 Hz à l'aide d'une barre d'oculométrie TobiiProFusion fixée sous l'écran d'ordinateur. Les participants ont été positionnés à une distance de 64 cm de l'écran dans une pièce avec une luminosité artificielle maintenue constante. Avant chaque enregistrement, une calibration en 5 points a été réalisée. Les données ont été enregistrées et traitées avec le logiciel TobiiProLab à l'aide du filtre « I-VT fixation » du logiciel. Les durées de fixation ainsi que le diamètre de la pupille ont été

recueillis (voir la partie résultats pour le détail de la mesure et du calcul de la dilatation pupillaire). Les données ont été traitées pour différents temps d'intérêt : (1) la phase de présentation de l'itinéraire (premier visionnage) ; (2) la mesure de base avant chaque phase de réponse (intersection sans repères avec une croix de fixation) ; (3) la phase de réponse pour le premier et dernier essai. La durée de la phase de présentation de l'itinéraire était de 20,15 secondes pour l'ensemble des participants. La durée de la phase de réponse variait entre les participants en fonction de leur temps de réponse et du nombre d'essais réalisés. Les données ont été traitées pour 2 zones d'intérêts par intersection (soit 4 zones d'intérêt par itinéraire) : repères saillants uniques/non uniques et repères non saillants uniques/non uniques.

Test des Matrices Progressives de Ravens '2

Les capacités d'induction et de déduction non verbales ont été mesurées à l'aide du test des « RAVEN'S 2 - Matrices Progressives » (Raven, 2019). Ce test a été étalonné en population française auprès de personnes âgées de 4 à 69 ans et 11 mois. Pour les personnes du groupe DT, la version de 9 à 69 ans 11 mois a été utilisée. Elle est composée de 4 séries comportant chacune 12 items (B, C, D, E). Les participants disposaient de 45 minutes maximum pour réaliser le test. Les participants du groupe DI ont réalisé la version destinée aux 4-8 ans, composée de 3 séries de 12 items chacune (A, B, C). Les participants disposaient de 30 minutes maximum pour réaliser le test. Lors de chaque item, une figure constituée de formes géométriques dont une partie est manquante était présentée au participant. Il devait, parmi 5 réponses données, sélectionner la pièce manquante. Les réponses correctes étaient cotées 1 et les réponses fausses étaient cotées 0. La somme des notes a été réalisée pour donner lieu à un score brut total sur 48 pour la première version et un score de 36 pour la seconde version. Un score élevé indique ainsi une performance élevée.

Questionnaire de fréquence des déplacements et d'utilisation des jeux vidéo

Le questionnaire de la mesure de la fréquence des déplacements a été créé en s'inspirant de celui réalisé par Armougum et al. (2019). Il est composé de trois questions portant sur les déplacements réalisés seul, accompagné et les déplacements non habituels. Les réponses sont données sur une échelle de Likert en 5 points dont les modalités de réponses sont : « Jamais », « Quelques fois dans le mois », « Une à trois fois par semaine », « Plus de trois fois par

semaine » et « Tous les jours ». Les réponses sont cotées de 1 à 5 donnant lieu à un score total sur 15. Un score élevé traduit un déplacement fréquent. La mesure de la fréquence d'utilisation des jeux vidéo a été réalisée à l'aide d'un questionnaire traduit de l'étude de De Castell et al. (2019). Le questionnaire a été étayé avec d'autres exemples de jeux vidéo. Il comportait une question sur la fréquence d'utilisation des jeux vidéo lors des 6 derniers mois dont les modalités de réponses étaient présentées sur une échelle de Likert en 5 points « Jamais », « Rarement », « Parfois », « Fréquemment » et « Souvent ». Par la suite 5 questions ouvertes étaient présentées où il était demandé au participant d'estimer le nombre d'heures par semaine alloué à chaque type de jeu (jeux vidéo de tirs à la première personne, jeux vidéo de rôle, d'avion ou voiture, jeux de plateforme et/ou d'action et enfin jeux vidéo de sport). Les questionnaires sont présents en Annexe 10.

2.3.Procédure

Avant chaque début d'expérimentation, les formulaires de consentements ont été recueillis. Les passations ont duré entre 45 minutes et 1 heure 15 minutes dans une pièce calme de manière individuelle et ont été réalisées en 2 temps pour les participants du groupe DI. Dans un premier temps, les participants ont réalisé le test des Progressives Matrices de Raven's 2 en version papier. Dans un second temps, ils ont été installés face à l'ordinateur et ont réalisé la phase de calibration en 5 points. Après cette phase, les participants ont réalisé la tâche d'apprentissage d'itinéraires puis ont répondu au questionnaire mesurant la fréquence des déplacements et l'utilisation des jeux vidéo (les consignes de passation sont présentées en Annexe 14 et 15). Des pauses ont été proposées et réalisées tout au long de l'expérimentation en fonction des besoins et demandes de chaque participant. La disposition de la salle de passation était conforme à celle présentée lors de la précédente expérience (voir Figure 20, chapitre 5).

2.4.Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel *Jamovi* (version 2.4) (*The Jamovi project*, 2023). Nous avons vérifié la normalité des échantillons à l'aide du test du Shapiro-Wilk. Lorsque la normalité était respectée, nous avons effectué un test de Student pour réaliser les comparaisons inter- et intragroupes. Lorsque la normalité n'était pas respectée, nous avons réalisé un test U de Mann-Whitney pour les comparaisons inter-groupes et un test de Wilcoxon pour les comparaisons intragroupes.

3. Résultats

3.1. Nombre d'essais et d'erreurs

Nous avons comparé le nombre d'essais et d'erreurs entre les groupes en fonction du type de route (aidante ou non-aidante). Les participants du groupe DI effectuent en moyenne un nombre plus important d'erreurs que les participants du groupe DT lors de l'apprentissage des routes aidantes ($U(26,31)=91.5$; $p<.001$) et non aidantes ($U(26,31)=105.5$; $p<.001$). Ils effectuent également un nombre d'essais plus élevé pour les deux types de routes (aidantes : $U(26,31)=91$; $p<.001$; non aidantes : $U(26,31)=108$; $p<.001$). Les résultats concernant le nombre moyen d'erreurs et d'essais sont représentés dans le Tableau 10.

Concernant l'ensemble des participants, il n'y a pas de différence significative pour le nombre d'erreurs moyen lors de l'apprentissage des routes aidantes en comparaison avec les routes non-aidantes ($W=414$; $p=.084$). Cependant, la différence est significative pour le nombre d'essais ($t(56)=-1.73$; $p<.05$). Les participants effectuent en moyenne un nombre plus faible d'essais lors de l'apprentissage des routes aidantes plutôt que non-aidantes.

En ce qui concerne le groupe DI, il n'y a pas de différence significative entre les routes aidantes et non-aidantes pour le nombre d'erreurs ($t(25)=-0.65$; $p=.26$) et le nombre d'essais ($t(25)=-0.75$; $p=.23$). Ce n'est pas le cas pour le groupe DT dans lequel les participants font significativement moins d'erreurs dans la condition routes aidantes plutôt que non-aidantes ($W=92$; $p=.05$). Il en est de même concernant le nombre d'essais ($t(30)=-1.73$; $p<.05$).

3.2. Temps de réponse

Les participants du groupe DI mettent en moyenne plus de temps à répondre que les participants du groupe DT, que ce soit pour les routes aidantes ($U(26,31)=147$; $p<.001$) ou non-aidantes ($U(26,31)=132$; $p<.001$).

Concernant la différence entre les deux types de routes, l'ensemble des participants répondent plus rapidement aux intersections des routes aidantes plutôt que non-aidantes ($W=340$; $p<.001$). Cette différence est également significative au sein de chaque groupe (DI : $W=79$; $p=.006$; DT : $W=84$; $p<.001$). Les résultats concernant le temps moyen de réponse sont présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10. Nombre moyen d’essais, d’erreurs et de temps de réponse par groupe et type de route

	DI	DT	Valeur de p
Nombre d’erreurs moyen (écart-type)			
Routes aidantes	5,28 (4,94)	0,43 (0,48)	<.001
Routes non-aidantes	5,54 (4,74)	0,77 (1,06)	<.001
Nombre d’essais moyen (écart-type)			
Routes aidantes	3,86 (1,10)	2,32 (0,32)	<.001
Routes non-aidantes	3,96 (1,06)	2,51 (0,55)	<.001
Temps de réponse moyen¹ (écart-type)			
Routes aidantes	2855 (2142)	1457 (492)	<.001
Routes non-aidantes	2971 (2078)	1625 (516)	<.001

*Note.*¹Temps de réponse moyen en millisecondes.

3.3. Temps de fixation

Les analyses suivantes (fixations et pupillométrie) portent sur 30 participants dans le groupe DT et 22 participants dans le groupe DI en raison des données manquantes liées à l’enregistrement des mouvements oculaires.

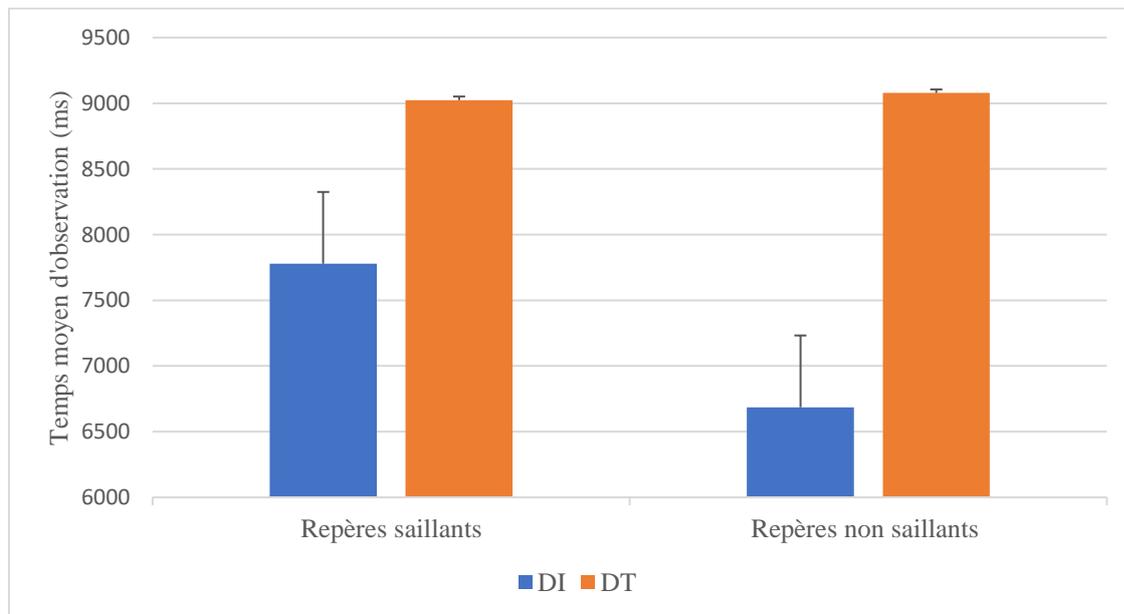
Sensibilité à la saillance des repères pendant la phase de visionnage

Afin d’évaluer la sensibilité à la saillance pendant la phase d’observation de la vidéo, nous avons comparé le temps passé à observer les repères saillants et non saillants à l’occasion de la toute première rencontre avec les repères. Les résultats relatifs à l’ensemble des participants ne permettent pas de relever une différence significative entre le temps passé à regarder les repères saillants et non saillants ($W=780$; $p=.20$). Cependant, lorsqu’on fait cette analyse au sein de chaque groupe, on relève une différence significative pour le groupe DI ($t(21)=2.47$; $p=.01$),

mais il n'y a pas de différence significative pour le groupe DT ($W=194$; $p=.79$). Les participants du groupe DI passent en moyenne un temps supérieur à observer les repères saillants plutôt que non saillants.

Concernant les différences inter-groupes, la différence s'approche du seuil de significativité pour le temps moyen passé à observer les repères saillants ($t(50)=-1.61$; $p=.06$) et il y a une différence significative pour les repères non saillants ($U(22,30)=192$; $p=.005$). Les participants du groupe DT observent en moyenne durant plus de temps les repères saillants et non saillants. Les résultats sont représentés dans la Figure 30

Figure 30. Temps d'observation moyen des repères saillants ou non saillants en fonction du groupe lors de la première rencontre de la phase de visionnage



Repères uniques et non uniques pendant la phase de visionnage (première et deuxième rencontre)

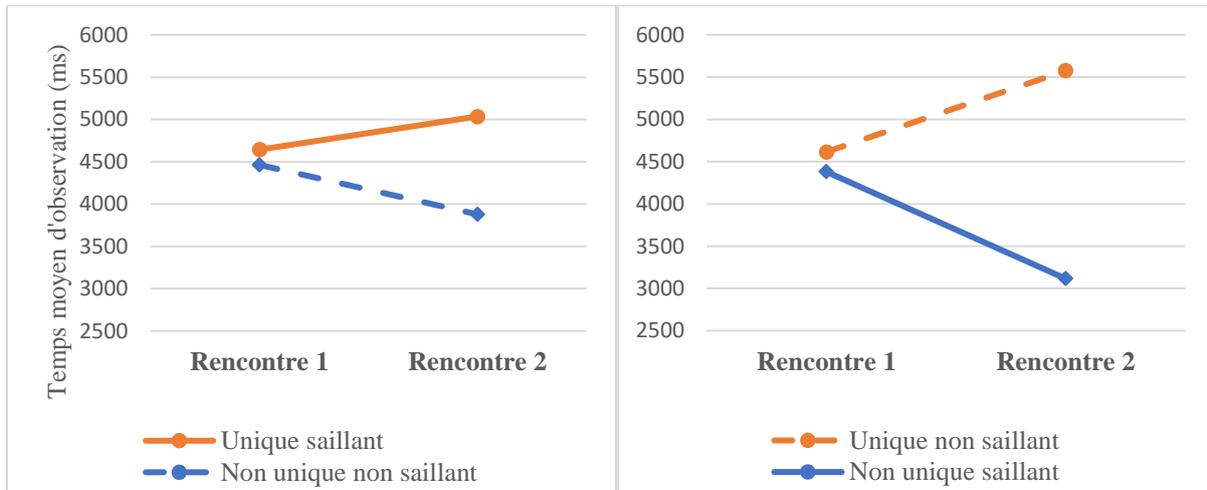
Afin d'apprécier la capacité à orienter l'attention sur les repères pertinents à l'occasion du visionnage de l'itinéraire, nous avons comparé les durées de fixation des repères non uniques entre la première et la deuxième rencontre. En ce sens, la diminution (entre deux rencontres) du temps de fixation alloué aux repères non uniques a été utilisée comme un indicateur de la

capacité à désengager son attention des repères considérés comme non-aidants pour l'apprentissage.

Pour l'ensemble des participants, il y a un effet de la rencontre (saillants : $t(51)=7.35$; $p<.001$; non saillants : $t(51)=3.77$; $p>.001$). Ils observent moins longtemps les repères non uniques lors de la seconde rencontre en comparaison avec la première, qu'ils soient saillants (4130 vs 3024 ms) ou non (3985 vs 3498 ms). Concernant les repères uniques, on relève une différence uniquement pour les repères non saillants ($t(51)=-4.76$; $p<.001$). Les participants observent davantage les repères non saillants uniques lors de la seconde rencontre (4081 vs 4862 ms). On ne relève pas de différence significative concernant les repères uniques saillants entre la première et la seconde rencontre ($t(51)=-0.79$; $p=.21$) (4368 vs 4492 ms).

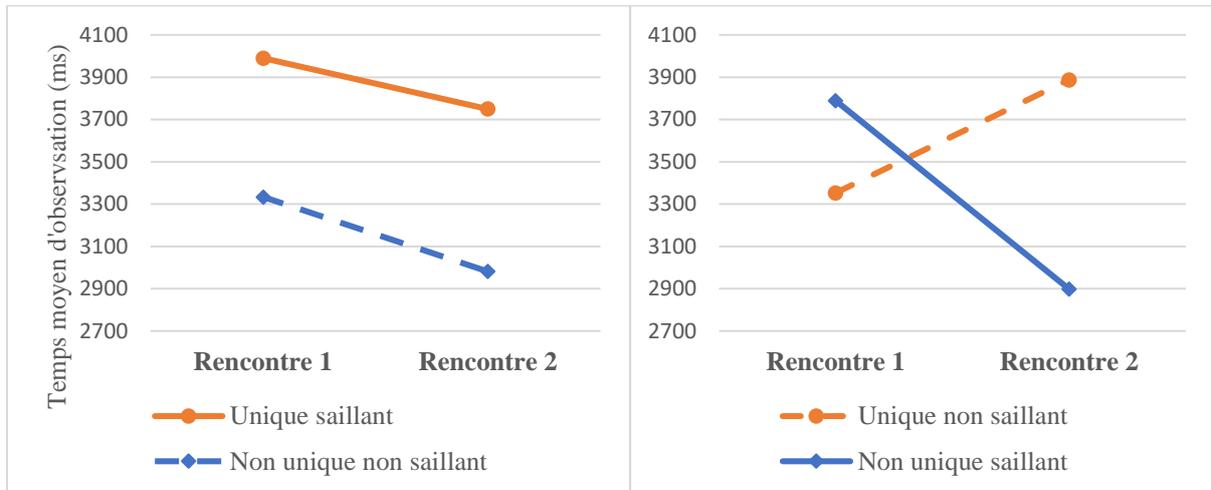
Concernant le groupe DT, l'effet de la rencontre sur le temps d'observation des repères non uniques saillants et non saillants est significatif (respectivement, $t(29)=6.29$; $p<.001$ et $t(29)=4.12$; $p<.001$). Les participants observent moins longtemps les repères non uniques lors de la seconde rencontre lorsqu'ils sont saillants (4380 vs 3116 ms) et non saillants (4463 vs 3878 ms). Pour les repères uniques, on note également un effet de la rencontre sur le temps d'observation des repères saillants ($t(29)=-1.80$; $p<.05$) et non saillants ($t(29)=-4.42$; $p<.001$). Les participants passent en moyenne un temps supérieur à observer les repères saillants (4644 vs 5036 ms) et non saillants (4616 vs 5576 ms) lors de la seconde rencontre. Ainsi, dès la phase de visionnage, les participants DT regardent moins longtemps le repère non unique à la seconde rencontre, que celui-ci soit saillant ou non. Inversement, ils regardent plus longtemps le repère unique, qu'il soit saillant ou non. Les résultats sont présentés dans la Figure 31.

Figure 31. Phase de visionnage : temps d'observation des repères dans le groupe DT en fonction de la rencontre et du type de repère



L'analyse portant sur le groupe DI indique que les participants regardent moins longtemps les repères non uniques saillants visuellement lors de la deuxième rencontre (3789 vs 2898 ms ; $t(21)=3.98$; $p<.001$). Pour les repères non uniques et non saillants, la différence s'approche du seuil de significativité (3334 vs 2981 ms ; $t(21)=1.49$; $p=.08$). Pour les repères uniques, la différence est significative pour les repères non saillants ($t(21)=-2.19$; $p=.02$). Les participants passent en moyenne un temps supérieur à observer les repères lors de la seconde rencontre (3353 vs 3888 ms). La différence n'est pas significative concernant les repères saillants ($t(21)=1.16$; $p=.87$) (3990 vs 3749 ms). Ainsi, dès la phase de visionnage, les participants avec DI regardent moins longtemps les repères non uniques saillants à la seconde rencontre. Les résultats sont présentés dans la Figure 32.

Figure 32. Phase de visionnage : temps d'observation des repères dans le groupe DI en fonction de la rencontre et du type de repère



En résumé, pendant la phase de visionnage de l'itinéraire, la saillance des repères influence différemment les temps de fixation des deux groupes. Les participants du groupe DT n'observent pas durant plus de temps un repère en fonction de sa saillance perceptive, la différence s'opère en fonction du caractère unique ou non unique du repère. Que le repère soit saillant ou non, les participants observent durant moins longtemps les repères non uniques lors de la seconde rencontre. Les participants du groupe DI, observent durant plus longtemps les repères saillants en comparaison des repères non saillants lors de la première rencontre. Les participants ont tendance à moins observer les repères non uniques lors de la seconde rencontre et observent davantage les repères uniques non saillants.

Temps de fixation pendant les essais (phase de réponse)

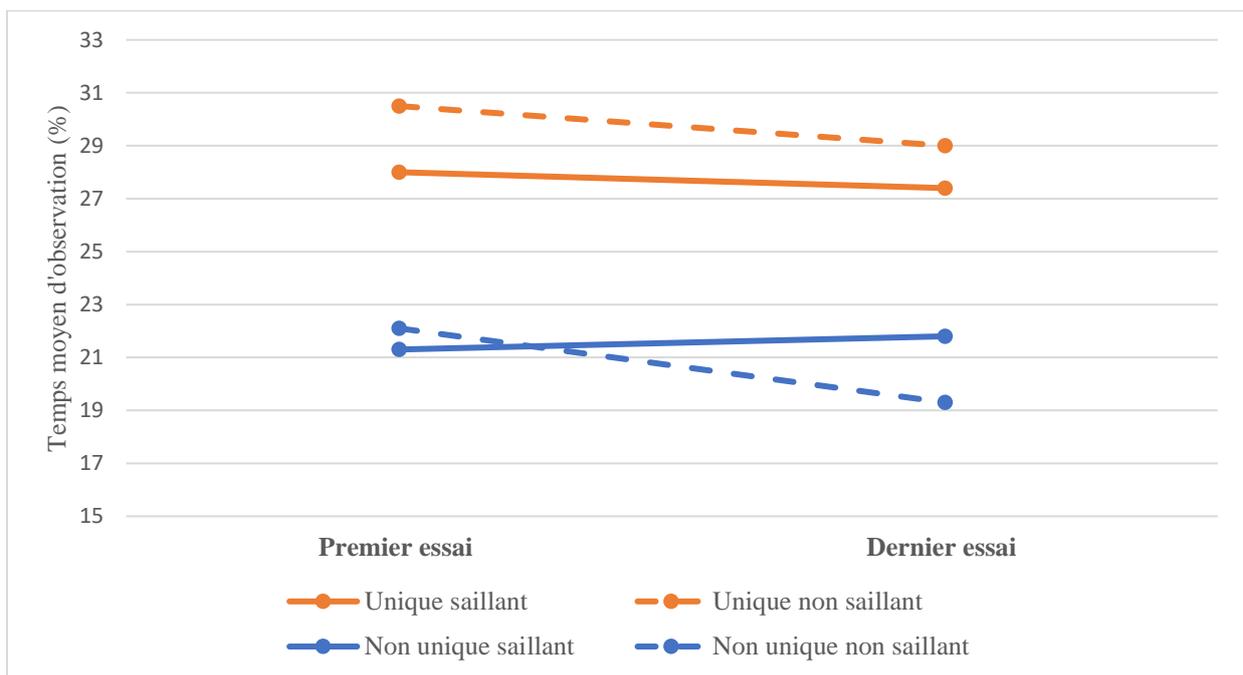
Le pourcentage de temps de fixation correspond au temps passé à observer un repère divisé par le temps de réponse pour chaque intersection de chaque essai (premier et dernier essai), multiplié par 100 ($\frac{\text{durée de fixation du repère}}{\text{Temps de réponse}} \times 100$).

Concernant les différences inter-groupes, les participants du groupe DT passent en moyenne un pourcentage de temps plus élevé que les participants avec DI à observer les repères, qu'ils soient saillants ou non saillants, uniques ou non unique ($p < .001$). Les valeurs sont présentées pour chacun des groupes dans la Figure 33 et 34.

Concernant le groupe DT, à l'occasion du premier essai, les participants observent en moyenne durant un pourcentage de temps plus élevé les repères uniques, qu'ils soient saillants (28% vs 21,3% ; $W=37$; $p<.001$) ou non saillants (30,5% vs 22,1% ; $W=4$; $p<.001$). Les analyses portant sur le dernier essai aboutissent aux mêmes conclusions (respectivement 27,4% vs 21,8% ; $W=105$; $p=.004$ et 29% vs 19,3% ; $t(29)=-6.19$; $p<.001$).

Si on analyse l'effet de l'essai sur les temps d'observation des repères non unique, on relève une diminution significative du temps pour les repères non saillants (22,1% vs 19,3% ; $t(29)=2.04$; $p=.02$), mais pas pour les repères saillants (21,3% vs 21,8% ; $t(29)=-0.50$; $p=.69$). Concernant les repères uniques, on ne relève pas de différence significative entre le premier et le dernier essai, qu'ils soient saillants (28% vs 27,4% ; $W=255$; $p=.68$) ou non saillants (30,5% vs 29% ; $t(29)=1.26$; $p=.89$). Les résultats sont présentés dans la Figure 33.

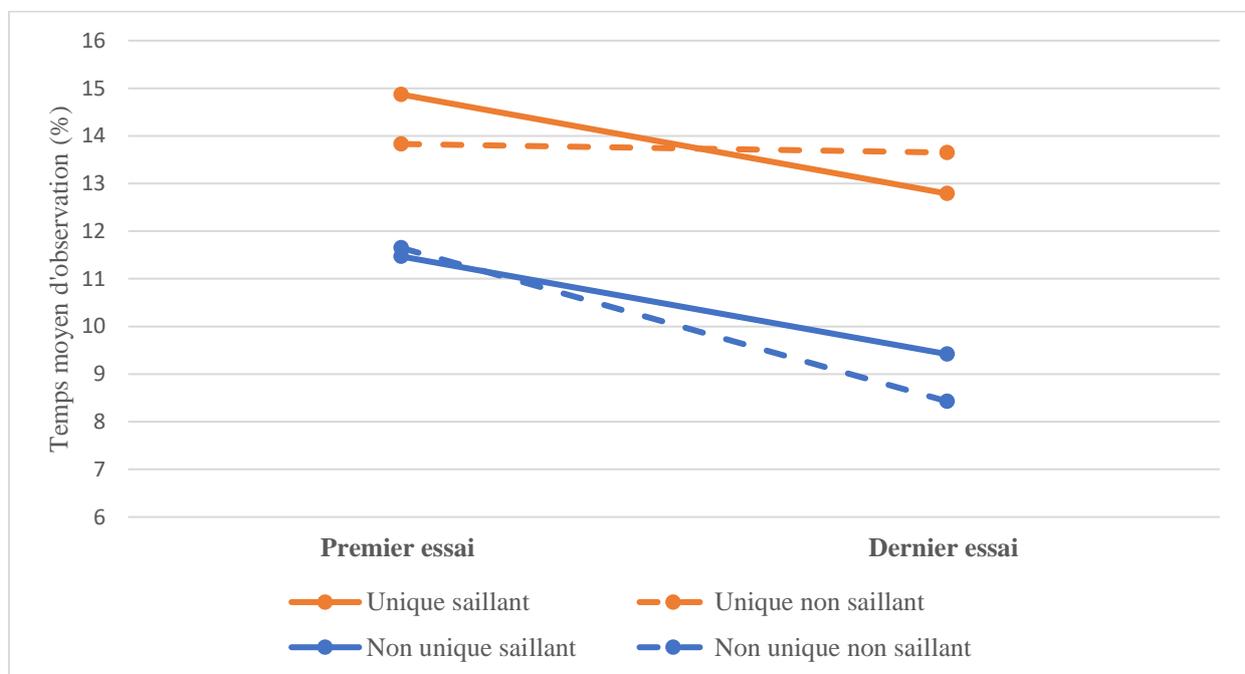
Figure 33. Temps moyen d'observation des repères dans le groupe DT en fonction de l'essai et du type de repère



Concernant le groupe DI, le pourcentage de temps passé à observer les repères uniques pendant le premier essai est supérieur à celui consacré aux repères non uniques, que ceux-ci soient saillants (14,87% vs 11,47% ; $t(21)=-3.59$; $p<.001$) ou non saillants (13,83% vs 11,65% ; $W=63$; $p<.05$). On retrouve le même effet au dernier essai (repères saillants : 12,79% vs 9,42%,

$t(21)=-3.65$; $p<.001$) ; repères non saillants : 13,65% vs 8,43%, $W=26$; $p<.001$). Lorsqu'on s'intéresse à l'effet de l'essai sur les temps d'observation, les participants avec DI observent moins longtemps les repères non uniques, qu'ils soient saillants (11,47% vs 9,42% ; $t(21)=2.35$; $p=.01$) ou non saillants (11,65% vs 8,43% ; $t(21)=4.30$; $p<.001$), lors du dernier essai. En ce qui concerne les repères uniques, on ne relève pas de différence significative entre le premier et le dernier essai pour les repères saillants (14,87% vs 12,79% ; $t(21)=1.99$; $p=.97$) et non saillants (13,83% vs 13,65% ; $W=142$; $p=.83$). Les résultats sont présentés graphiquement dans la Figure 34.

Figure 34. Temps moyen d'observation des repères dans le groupe DI en fonction de l'essai et du type de repère

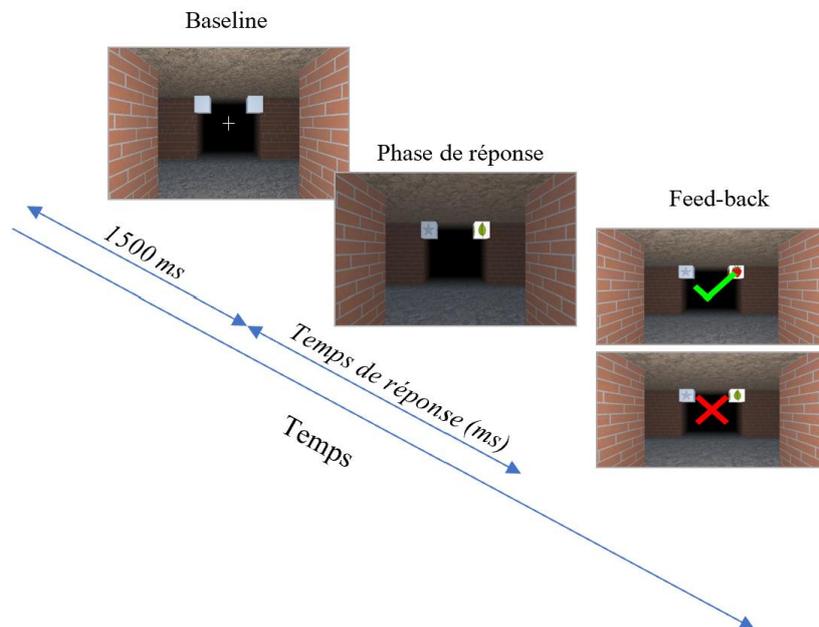


En résumé, les deux groupes regardent plus longtemps les repères uniques au premier et dernier essai. La répétition des essais diminue ou n'influence pas les pourcentages de temps d'observation alloués aux repères dans les deux groupes. Néanmoins, les groupes se différencient en fonction du repère. Les participants du groupe DT, observent durant moins longtemps les repères non uniques au dernier essai, mais uniquement s'ils sont non saillants. Les participants du groupe DI diminuent le temps alloué aux repères non uniques lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai, qu'ils soient saillants ou non.

3.4. Dilatation pupillaire

Dans le but d'évaluer le niveau de charge cognitive, nous avons mesuré le diamètre de la pupille 1500 millisecondes avant et pendant la phase de réponse. Nous avons soustrait ces deux mesures pour obtenir la dilatation pupillaire et l'étudier en fonction du type de route (aidante ou non-aidante) et essai réalisé. Ces mesures sont présentées dans la Figure 35.

Figure 35. *Détail de la mesure du diamètre pupillaire pour une intersection*

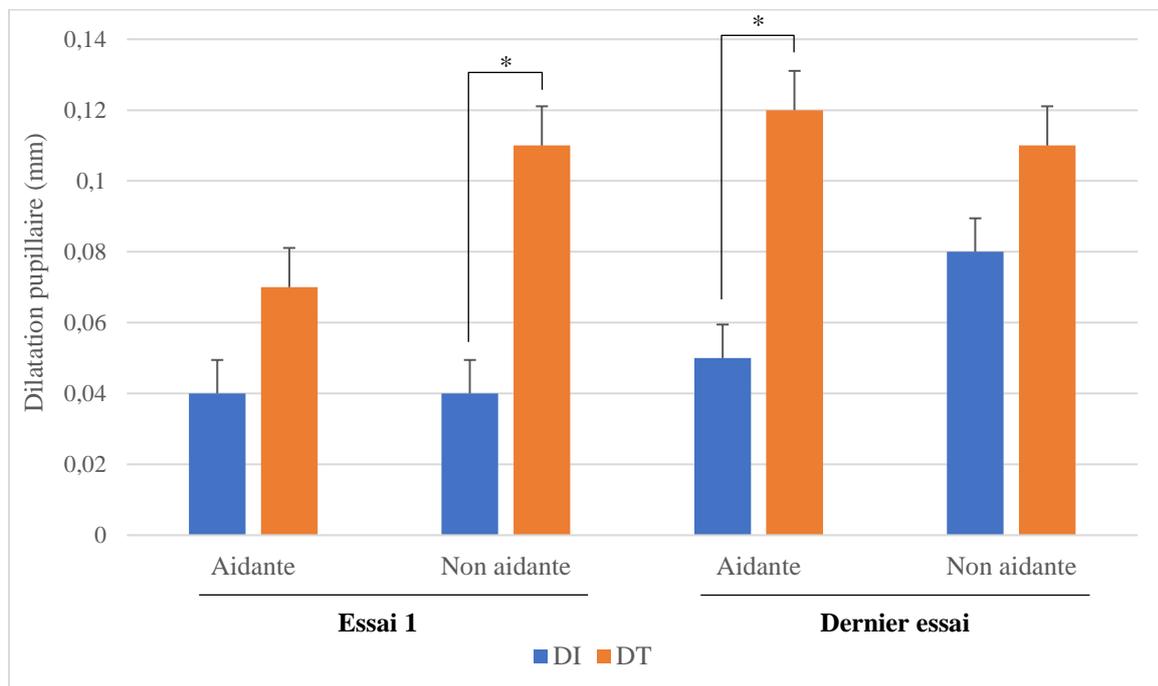


L'influence du type de route sur la dilatation pupillaire

Concernant l'ensemble des participants, on ne relève pas de différence significative de dilatation pupillaire entre les routes aidantes et non-aidantes lors du premier essai ($W=560$; $p=.12$) et du dernier essai ($t(51)=-0.70$; $p=.24$). Pour le groupe DT, on relève une différence significative lors du premier essai ($W=135$; $p<.05$). Les participants ont une dilatation pupillaire plus élevée lors des routes non-aidantes plutôt qu'aidantes. Il n'y a pas de différence significative lors du dernier essai ($t(29)=0.51$; $p=.69$). Pour le groupe DI, il n'y a pas de différence lors du premier essai ($W=142$; $p=.70$), mais une différence significative lors du dernier essai ($t(21)=-2.11$; $p<.05$). Les participants du groupe DI ont une dilatation pupillaire plus élevée en moyenne lors des routes non-aidantes lors du dernier essai en comparaison avec les routes aidantes. Les résultats sont représentés dans la Figure 36.

Les comparaisons inter-groupes indiquent une différence significative de dilatation pupillaire au cours du dernier essai lors de la réalisation des routes aidantes ($U(22,30)=195$; $p=.01$) et du premier essai lors des routes non-aidantes ($t(50)=-2.26$; $p=.03$). Les participants du groupe DT ont une dilatation pupillaire plus importante que les participants du groupe DI. Il n'y a pas de différence significative concernant le premier essai des routes aidantes ($U(22,30)=270$; $p=.27$) et le dernier essai des routes non-aidantes ($t(50)=-0.84$; $p=.41$).

Figure 36. Dilatation pupillaire en fonction du groupe, de la route et de l'essai



Note. $*p<.05$.

En résumé, dans les deux groupes, la dilatation pupillaire est plus importante lorsqu'ils restituent des routes non-aidantes, mais cet effet ne se produit pas au même essai en fonction du groupe. Dans le groupe DT, la dilatation pupillaire est plus importante pour les routes aidantes lors du premier essai, tandis que pour le groupe DI cette différence se manifeste lors du dernier essai. Enfin, la dilatation pupillaire est plus importante dans le groupe DT en comparaison avec le groupe DI pour la moitié des comparaisons.

L'influence de la répétition des essais sur la dilatation pupillaire

Concernant l'effet de la répétition des essais sur la dilatation pupillaire, les analyses réalisées au sein de groupe DT montrent un effet significatif de l'essai, mais uniquement pour les routes aidantes ($W=92$; $p<.01$). Les participants ont une dilatation pupillaire plus élevée lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai. Les analyses réalisées au sein du groupe DI montrent un effet significatif de l'essai lors de la réalisation des routes non-aidantes uniquement ($W=48$; $p<.01$). Les participants ont une dilatation pupillaire plus élevée lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai. Ainsi, la répétition des essais influence la dilatation pupillaire dans les deux groupes, mais se manifeste différemment en fonction du groupe et du type de route présenté (aidantes ou non-aidantes). Il est important de rappeler que ces résultats portent sur l'effet de la répétition d'un itinéraire, ce qui n'implique pas forcément un effet d'apprentissage.

3.5. Analyses de corrélation

Afin d'évaluer s'il existe un lien entre la fréquence d'utilisation des jeux vidéo et le nombre d'erreurs et d'essais réalisés, nous avons effectué des corrélations de Spearman dans chacun des groupes. Dans le groupe DT, on relève une corrélation positive significative entre le nombre d'heures passées à jouer aux jeux vidéo et le nombre d'essais ($r=.43$; $p=.02$) et erreurs ($r=.45$; $p=.01$) réalisés lors des routes non-aidantes. Plus les participants jouent aux jeux vidéo, plus le nombre d'erreurs et d'essais est important. Dans le groupe DI, la corrélation négative s'approche du seuil de significativité entre le nombre d'heures passées à jouer aux jeux vidéo et le nombre d'essais réalisés lors des routes non-aidantes ($r=-.37$; $p=.066$). Plus les participants jouent aux jeux vidéo, moins ils font d'essais.

Nous avons également réalisé des corrélations entre le niveau de fréquence des déplacements et le nombre d'erreurs et d'essais. On ne relève pas de corrélations significatives dans les deux groupes, il ne semble donc pas avoir de lien entre la fréquence des déplacements et la performance à la tâche d'apprentissage d'itinéraires. On ne relève également pas de corrélations significatives dans les deux groupes entre les scores obtenus aux Matrices de Raven's 2 et le nombre d'erreurs et d'essais.

4. Discussion

L'objectif de cette expérience était d'étudier l'influence de la saillance perceptive et l'unicité des points de repère sur l'apprentissage d'itinéraires en environnements virtuels auprès de personnes présentant une DI et de personnes au développement typique. Pour ce faire, nous avons fait varier la saillance et l'unicité des repères pour comparer : (1) le nombre d'erreurs, le temps de réponse et le nombre d'essais ; (2) les durées de fixation des repères ; (3) la dilatation pupillaire à titre exploratoire. Ces variables ont été étudiées aux différentes phases d'apprentissage d'itinéraire : le premier visionnage de l'itinéraire et les phases de réponse du premier et dernier essai.

4.1. Les participants au développement typique

Concernant l'aspect facilitateur des routes composées de repères uniques saillants visuellement lors de l'apprentissage (routes aidantes), conformément aux hypothèses, les participants du groupe DT font moins d'essais et ont tendance à faire moins d'erreurs en comparaison avec les routes non-aidantes. Les participants mémorisent donc plus rapidement les routes quand les repères uniques sont saillants. Ces résultats qui montrent l'effet bénéfique de la saillance perceptive sur l'apprentissage, sont dans la continuité de ceux observés par Albrecht et von Stuelpnagel (2018) qui ont montré que les participants mémorisent mieux un itinéraire lorsque les repères visuellement saillants sont positionnés sur le chemin à emprunter. Concernant le temps de réponse en fonction du type de route, les participants répondent aussi plus rapidement lors des routes aidantes plutôt que non-aidantes. Ce résultat peut être expliqué par l'influence de la saillance perceptive sur le temps nécessaire à ce que l'attention soit engagée sur le stimulus (Töllner et al., 2011). Ainsi, lorsque les repères uniques sont saillants, l'attention est directement orientée vers l'information pertinente pour la réponse de direction, ce qui diminue le temps de réponse.

Concernant l'observation des repères saillants visuellement lors de la phase de visionnage, les résultats ne permettent pas de confirmer les hypothèses formulées. Les participants n'observent pas durant plus de temps les repères saillants en comparaison avec les repères non saillants. D'après le modèle Caduff et Timpf (2008), la sélection des repères dans le groupe DT s'opérerait dans cette tâche davantage sur des processus de haut niveau (stratégie utile pour la tâche), plutôt que bas niveau (saillance perceptive du repère). Les temps de fixation alloués aux repères uniques et non uniques en fonction la rencontre vont dans ce sens en phase de visionnage et en phase de réponse.

À propos du temps de fixation des repères en fonction de la rencontre (en phase de visionnage), conformément aux hypothèses formulées, les participants du groupe DT observent durant moins longtemps les repères non uniques lors de la seconde rencontre et passent un temps supérieur à observer les repères uniques. Cela témoigne de la mise en place d'une stratégie de sélection par les participants dès la phase de visionnage. Cette stratégie basée sur le caractère unique du repère implique à titre d'exemple que le participant : (1) identifie la répétition des repères (fixation des 2 types de repères), (2) catégorise les repères uniques et non uniques comme aidant/non aidant pour l'apprentissage, (3) désengage son attention du repère non pertinent ou d'une autre zone de l'environnement (cas de figure où l'attention n'est pas déjà orientée sur le repère jugé comme pertinent), (4) oriente et focalise son attention sur le repère qu'il juge comme aidant à l'apprentissage de direction : le repère unique (fixation du repère unique). Cette stratégie de navigation plus ou moins consciente et automatisée peut être influencée par de nombreuses variables telles que : l'expérience de déplacement, l'usage des jeux vidéo, la motivation, l'attention, la mémoire, la compréhension de la consigne, etc. Il est important de rappeler qu'il existe de nombreuses stratégies d'apprentissage qui peuvent être employées par les participants (Courbois et al., 2024; Wen et al., 2011, 2013) et qu'il s'agit ici d'identifier la stratégie visuelle la plus souvent utilisée sur le plan inter-individuel mais aussi intra-individuel (au fil des essais).

Les résultats en phase de réponse montrent que les participants observent également durant plus de temps les repères uniques plutôt que non uniques, indépendamment de la saillance perceptive. Ainsi, la stratégie de sélection développée dès la phase de visionnage perdure lors de la phase de réponse et la répétition des essais. Cette constance peut s'expliquer par la nature même du point de repère impliqué et sélectionné. Les repères uniques faisant ici l'objet d'une sélection basée sur la stratégie d'apprentissage établie par l'individu (processus *top-down*), les durées de fixations sont moins influencées par la saillance perceptive et les variations qu'elle implique (par exemple l'effet d'habituation). Ces résultats vont dans le sens des travaux réalisés par Wenczel et al. (2017), qui montraient que l'intention d'apprendre un itinéraire augmentait le temps d'observation des repères saillants structurellement, mais n'influçait pas l'observation des repères saillants perceptivement.

Les résultats relatifs à la dilatation pupillaire vont dans le sens des hypothèses formulées. Lors du premier essai, la dilatation pupillaire est plus élevée lorsque les participants réalisent les routes non-aidantes en comparaison avec les routes aidantes. Ce résultat est en adéquation avec le nombre d'essais et d'erreurs plus important pour les routes non-aidantes. Sous l'angle de la

charge cognitive, ces résultats montrent l'importance de la saillance perceptive des repères dans l'apprentissage des itinéraires et la pertinence de son utilisation pour diminuer le niveau de charge cognitive associé à l'apprentissage d'itinéraires. Cet effet bénéfique relevé pour la mise en surbrillance des chemins sur une carte de navigation (Fang et al., 2020), semble donc s'appliquer à l'apprentissage d'itinéraires en EV. Ces résultats corroborent également les travaux réalisés par Laeng et al. (2011) qui montraient une dilatation pupillaire plus importante lorsque la tâche de Stroop impliquait un processus d'inhibition.

En ce qui concerne la répétition des essais, il y a un effet uniquement lors des routes aidantes. Contrairement aux hypothèses formulées, la dilatation pupillaire augmente entre le premier et dernier essai. Ce résultat est contraire aux travaux qui montraient une diminution de la dilatation pupillaire au fil des essais en lien avec l'apprentissage d'un itinéraire (De Condappa & Wiener, 2016; Mueller et al., 2008). Néanmoins, l'augmentation de la dilatation pupillaire pourrait s'expliquer par un effet de concentration. Comme montré par Lisi et al. (2015) la dilatation pupillaire est sensible aux demandes attentionnelles suscitées par la consigne de la tâche (processus *top-down*). Ainsi, le critère d'apprentissage de 2 essais consécutifs sans erreurs implique pour le participant de maintenir son attention de manière continue lors de deux essais pour éviter de répéter la tâche en cas d'erreur. En ce sens, certains participants ont expliqué s'être concentrés de manière plus importante lors du second essai pour pouvoir valider le critère de réussite. L'hypothèse de l'effet de la fatigue pourrait aussi être évoquée. Cet effet est censé être minoré par la présentation aléatoire des itinéraires, mais il peut cependant se produire lorsque le participant a besoin de plusieurs essais pour atteindre le critère d'apprentissage (5 essais). Comme évoqué en introduction du manuscrit, un jumelage avec d'autres outils de mesure de la charge cognitive (mesures électrodermales) serait nécessaire pour affiner ces résultats qui ont actuellement une visée exploratoire.

4.2. Comparaison des résultats avec l'étude Grzeschik et al. (2019)

Le design expérimental de cette étude était inspiré de celui réalisé par Grzeschik et al. (2019), nous pouvons donc comparer les résultats obtenus par les participants au développement typique à ceux obtenus dans leur étude par les participants jeunes.

Contrairement aux résultats obtenus par ces auteurs pendant la phase de visionnage, les participants du groupe DT n'observent pas durant plus de temps les repères saillants plutôt que non saillants. Cette différence peut être due aux aspects visuels des deux environnements virtuels. En effet, dans l'étude de Grzeschik et al. les repères sont directement positionnés dans l'environnement tandis que dans la présente étude ils sont positionnés dans des cubes blancs.

La présence des cubes blancs génère un niveau de saillance perceptive initial élevé, ce qui peut avoir minoré l'effet de celle-ci sur les temps de fixation. Dans la continuité des interprétations réalisées selon le modèle de Caduff et Timpf (2008), le poids accordé à la saillance perceptive des repères (tous deux saillant par rapport à l'environnement) serait ainsi moins important que le poids accordé à l'unicité des repères. Ces résultats laisseraient supposer qu'en l'absence de repères uniques et non uniques, la saillance perceptive ou cognitive ait un poids plus important dans la sélection des repères.

Au sujet des temps de fixation des repères uniques et non uniques, conformément aux résultats observés par Grzeschik et al., les participants du groupe DT observent durant moins longtemps les repères non uniques lors de la seconde rencontre et passent un temps supérieur à observer les repères uniques. Cette similitude entre les deux expériences permet d'agrémenter les connaissances relatives aux processus attentionnels (notamment les processus d'inhibition) impliqués dans la sélection des repères uniques et non uniques.

Concernant l'aspect facilitateur des routes aidantes lors de l'apprentissage, les participants du groupe DT parviennent plus facilement à apprendre les routes lorsqu'elles sont aidantes plutôt que non-aidantes. Ils répondent plus rapidement, font moins d'erreurs et ont besoin de moins d'essais pour parvenir au critère d'apprentissage. Ces résultats n'étaient pas relevés dans l'étude Grzeschik et al. qui ne relevaient pas de différences significatives du nombre d'erreurs et du temps de réponse entre les deux types de routes. Cet écart surprenant entre les deux études peut être interprété comme une illustration de la complexité des processus attentionnels dans une situation d'apprentissage. En effet, un repère du fait de ses caractéristiques propres et l'environnement dans lequel il est positionné peut attirer l'attention de manière « automatique » (processus *bottom-up*), ce qui est illustré par l'étude de Grzeschik et collaborateurs. Néanmoins, si le temps de fixation d'un repère peut être corrélé à l'apprentissage dans certaines situations (Hamid et al., 2010), il est avant tout le reflet d'un processus attentionnel qui peut déboucher ou non sur un encodage. Par conséquent, nous pouvons suggérer que les résultats de Grzechik et al. illustrent l'influence de la saillance perceptive des repères sur leur observation, tandis que les résultats de cette étude illustrent l'influence de la saillance perceptive sur l'apprentissage. Dans la présente expérience, la saillance perceptive facilite l'allocation d'attention sur les repères et favorise la mise en place d'une stratégie de sélection (*top-down*). L'environnement et les repères sont dans cette interprétation, des aides attentionnelles qui ne doivent pas remplacer et/ou parasiter l'allocation des ressources attentionnelles dirigées par la stratégie de navigation de l'individu.

4.3. Les participants avec une déficience intellectuelle

Conformément à nos hypothèses, les personnes du groupe DI sont sensibles à la saillance perceptive des points de repère en phase de visionnage. Elles passent plus de temps à observer les repères saillants plutôt que non saillants. Cette sensibilité à la saillance va dans le sens des résultats relevés dans la littérature (Carlin et al., 2003; N’Kaoua et al., 2019) et dans notre première étude. Ces résultats sont en contradiction avec l’hypothèse formulée par Boot et al. (2012) concernant une possible altération de création d’une carte de saillance interne chez les personnes avec une DI. Il est important de rappeler que cette étude s’était déroulée auprès d’enfants âgés de 2 à 14 ans alors que nos participants sont des adultes. Une étude spécifiquement dédiée à cette question de recherche serait nécessaire pour éclaircir ce point.

La saillance des repères uniques ne semble pas avoir amélioré la performance des participants du groupe DI qui ne font pas moins d’essais, ni même moins d’erreurs lorsque les routes sont aidantes. En revanche, les routes aidantes leur permettent d’émettre plus rapidement leur réponse. Ressortir visuellement les informations aidantes pour l’apprentissage d’un itinéraire ne semble donc pas suffisant pour améliorer les performances d’apprentissage des personnes avec une DI. Néanmoins cela augmente la vitesse de traitement l’information visuelle et/ou de prise de décision. Ces résultats vont à l’encontre de ceux relevés par N’Kaoua et al. (2019) qui notaient une amélioration de l’apprentissage d’itinéraires lorsque les repères étaient en surbrillance. Toutefois, l’étude réalisée par ces auteurs s’intéressait aux repères en général et non à une catégorie de repères comme c’est le cas dans la présente étude qui porte sur les repères uniques et non uniques.

Concernant le temps passé à observer les repères uniques et non uniques, les résultats confirment partiellement les hypothèses. Lors de la phase de visionnage, les participants observent moins les repères non uniques saillants lors de la seconde rencontre et observent durant plus longtemps les repères uniques non saillants. La différence entre les deux rencontres n’est pas significative pour les deux autres types de repères. Ce résultat est intéressant, car il indique que, bien que des difficultés attentionnelles soient souvent présentes (Lense et al., 2011; Spaniol & Danielsson, 2022), les personnes avec une DI parviennent à désengager leur attention du repère non unique saillant pour l’orienter vers le repère unique. Outre cet aspect, ces résultats montrent aussi l’influence de la saillance perceptive sur la mise en place d’une stratégie de sélection. En effet, lorsque les repères sont saillants et uniques, il n’y a pas de différence de temps alloué à ces repères lors de la seconde rencontre. Ainsi, si la saillance perceptive des repères est en adéquation avec la stratégie de sélection, les participants ne semblent pas modifier

leur comportement d'observation. Or, si les repères saillants ne sont pas en adéquation avec la stratégie de sélection, alors les participants modifient leurs comportements d'observation en lien avec leur stratégie de sélection (processus *top-down*).

En phase de réponse (premier et dernier essai), les participants du groupe du DI observent durant plus de temps les repères uniques plutôt que non uniques, qu'ils soient saillants ou non saillants. Ces résultats vont à l'encontre des hypothèses formulées en lien avec les difficultés de sélection des points de repère énoncées par la littérature en condition réelle et virtuelle (Courbois et al., 2012 ; Farran et al., 2015). Ainsi, lors de l'apprentissage d'un court itinéraire en EV pauvre en stimulations, les personnes avec une DI savent dès le premier essai sélectionner (visuellement) les repères uniques plutôt que non uniques. La recherche réalisée par Courbois et al. (2012) en condition réelle étudiait le processus de sélection en demandant aux participants de nommer les repères et portait sur des adolescents. Plusieurs pistes peuvent expliquer cette différence. La première piste, énoncée précédemment serait que la saillance des repères aide les participants à identifier leur caractère unique ou non unique. Une autre piste, en lien avec les résultats de l'étude 2, serait que l'environnement riche en stimulations et en points de repère impacte négativement les capacités de sélection des repères. Outre ces aspects, il est aussi possible que la sélection des repères s'opère visuellement, mais soit plus difficile à exprimer verbalement (Courbois et al., 2019).

Concernant l'effet de la répétition des essais, conformément aux hypothèses formulées, les participants semblent affiner leur stratégie de sélection des repères. Ils diminuent le temps passé à observer les repères non uniques au fil des essais et n'observent pas de manière différente les repères uniques. De cette façon, comme pour les précédentes études des travaux de thèse, l'amélioration des stratégies de sélection des repères se traduit par une diminution du temps alloué aux repères non-aidants pour l'apprentissage. Ces résultats vont dans le sens d'une sélection non ciblée des repères lors de la première exposition à l'itinéraire, laissant place grâce à la répétition des essais à la mise en place progressive d'une stratégie basée sur la diminution du temps alloué aux repères non pertinents.

La dilation pupillaire augmente au fil des essais, mais uniquement pour les routes non-aidantes. La charge cognitive serait ainsi plus élevée dans le groupe DI après avoir réalisé plusieurs fois un chemin qui ne facilite pas la sélection des repères. Ce résultat est contraire à ceux de la littérature où est rapportée une diminution de la dilatation au fil des essais en lien avec l'apprentissage (De Condappa & Wiener, 2016; Mueller et al., 2008). Il est possible que cela soit dû à un engagement progressif dans la tâche lorsque celle-ci présente un certain niveau de

difficulté. Cet engagement dans la tâche augmenterait ainsi le niveau de charge cognitive (Johnson et al., 2014). Par ailleurs, en ce qui concerne la différence de dilatation pupillaire entre les routes aidantes et non aidantes, nos hypothèses sont partiellement confirmées. Les participants du groupe DI ont une dilatation pupillaire plus élevée pour les routes non-aidantes en comparaison avec les routes aidantes, mais uniquement lors du dernier essai. Ce résultat peut également être le signe d'un engagement cognitif qui se met en place progressivement. Il est aussi à mettre en relation avec les observations des études 1 et 2 qui montrent que les profils de réponse des personnes avec une DI évoluent entre le premier et le dernier essai, marquant ainsi l'évolution des stratégies de réponse pendant la phase d'apprentissage.

4.4. Comparaisons entre les groupes

Conformément à la littérature, les participants du groupe DI ont besoin de plus d'essais et font plus d'erreurs que les participants du groupe DT. Par ailleurs leurs temps de réponse sont plus longs, ce qui est la conséquence d'un traitement de l'information plus lent (Kail, 1992). Malgré les différences au niveau des performances d'apprentissage, les mouvements oculaires permettent de relever de nombreuses similitudes entre les deux groupes, qui émettent dans l'ensemble le même style de stratégie de sélection des repères. Les différences entre les groupes se manifestent en fonction du temps de mesure et de la saillance perceptive du repère.

En accord avec les précédentes études portant sur l'observation des points de repère, les personnes avec une DI passent un temps plus faible que les DT à observer les repères lors de la phase de visionnage et lors de la phase de réponse. Ces résultats vont dans le sens de ceux obtenus par Farran et al. (2016) auprès de personnes avec un syndrome de Williams ainsi que ceux recueillis pour la première et seconde étude de ces travaux de thèse. L'augmentation de la saillance perceptive des repères ne semble pas diminuer les différences entre les groupes pour ce qui concerne la durée d'observation des repères. En ce qui concerne l'influence du caractère unique ou non unique des repères (en phase de visionnage), on note une augmentation du temps passé à observer les repères uniques dans le groupe DT lors de la seconde rencontre, qu'ils soient saillants ou non. En comparaison, les participants du groupe DI ne réalisent ce comportement d'observation que pour certains repères (repères uniques non saillants). La sélection des repères semble ainsi davantage influencée par des processus *top-down* (stratégie de sélection) chez les personnes du groupe DT en comparaison avec la sélection des personnes du groupe DI qui semble plus influencée par des processus *bottom-up* (la saillance).

Contrairement à nos hypothèses, le caractère aidant des repères uniques saillants se traduit dans les performances (moins d'essais et moins d'erreurs) uniquement auprès du groupe DT. Ce résultat est surprenant étant donné que les participants du groupe DI observent durant plus longtemps les repères saillants plutôt que non saillants, ce qui n'est pas relevé chez les participants du groupe DT. Comme évoqué précédemment, cette différence illustre l'importance de la mise en place par le participant d'une stratégie de sélection des repères (processus *top-down*). Une stratégie qui peut être favorisée ou parasitée par les caractéristiques des repères et de l'environnement (processus *bottom-up*).

En ce qui concerne la différence de dilatation pupillaire entre les groupes, les résultats vont à l'encontre des hypothèses. Contrairement aux résultats attendus, les personnes présentant une DI ont une dilatation pupillaire plus faible que les participants du groupe DT. Une interprétation possible serait que les participants avec une DI s'engagent moins cognitivement dans la tâche que les participants du groupe DT (Johnson et al., 2014). Cette interprétation pourrait aussi être mise en lien avec le concept de « sous-fonctionnement cognitif » qui correspond à une faiblesse du contrôle volontaire du traitement de l'information et de la résolution des problèmes (Paour, 2004). Ce résultat va à l'encontre de l'étude réalisée par Angulo-Chavira et al. (2017) qui montrait une dilatation pupillaire plus importante chez les personnes avec une DI en lien avec de moins bonnes performances réalisées au cours d'une tâche de détection de cible. L'effet de l'essai sur les différences de dilatation pupillaire entre routes aidantes et non-aidantes appuie cependant l'hypothèse d'un engagement progressif dans la tâche des personnes avec une DI. Dans le groupe DT, on observe une dilatation pupillaire plus élevée pour les routes non-aidantes lors du premier essai en comparaison avec les routes aidantes. On note le même résultat dans le groupe DI, mais uniquement lors du dernier essai. Ainsi, les participants du groupe DT seraient engagés dans la tâche dès le premier essai tandis que les participants du groupe DI auraient besoin de plusieurs essais pour s'engager dans la tâche.

Au sujet des limites de cette étude, on peut souligner la manière de manipuler le niveau de saillance perceptive. En effet, il serait intéressant de répliquer cette expérience sans la présence des cubes blancs pour manipuler la saillance dans un contexte plus écologique. Une seconde limite concerne la complexité de la tâche expérimentale. Pour inciter les participants à s'appuyer sur les points de repère (et non sur une séquence de directions), les intersections ont été montrées aléatoirement en phase de réponse. Malgré l'explication de ce point dans la consigne de la tâche à l'aide d'images et de phrases simples, certains participants des deux groupes ont rencontré une difficulté à intégrer cette particularité de la tâche. Ainsi, une partie

des erreurs réalisées par certains participants des deux groupes s'explique par une non-compréhension de la consigne et non par des difficultés cognitives ou spatiales. Une phase de familiarisation avec la tâche permettrait de pallier ce problème, mais augmenterait cependant la durée de la tâche.

5. Conclusion

En conclusion, la saillance perceptive des points de repère a des effets bénéfiques sur la rapidité de réponse chez l'ensemble des participants. Néanmoins, bien que les participants avec une DI semblent davantage s'appuyer sur la saillance perceptive des repères dans leurs comportements de sélection, celle-ci ne permet pas d'améliorer leur performance d'apprentissage dans cette étude. La sélection des repères uniques ne se met en place que partiellement lorsque les personnes avec une DI observent un itinéraire pour la première fois. Néanmoins, cette stratégie de sélection s'améliore dès la seconde exposition à l'itinéraire, et ce sans qu'aucune consigne ne soit donnée par l'expérimentateur. Ce résultat intéressant témoigne de la capacité à sélectionner les repères uniques plutôt que non uniques dans certaines conditions expérimentales. Ainsi, il semble possible de s'appuyer sur la saillance perceptive pour améliorer la sélection des repères, mais le principal facteur d'amélioration des performances d'apprentissage et de sélection repose sur la répétition des essais et la mise en place d'une stratégie de sélection par le participant.

Points importants de la troisième étude :

- Lorsqu'elles visionnent pour la première fois un itinéraire, les personnes avec DI réagissent clairement à la saillance perceptive en regardant plus longtemps les stimuli saillants.
- Lorsqu'elles visionnent pour la première fois un itinéraire, les personnes avec DI semblent détecter que certains repères sont multiples.
- Lorsqu'elles apprennent un itinéraire, les personnes avec DI regardent plus longtemps les repères uniques, qu'ils soient saillants ou non.
- Lorsque les stimuli saillants sont aidants (c'est-à-dire uniques), les personnes avec DI sont plus rapides à émettre leur réponse, pour autant cela ne se traduit pas par une réduction de l'erreur.
- Chez les personnes avec DI, il semblerait que la saillance perceptive facilite l'identification des repères non uniques et, par voie de conséquence, le report de l'attention vers le repère unique, même s'il est non saillant.

CHAPITRE 7 :
DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif de ces travaux de thèse était d'étudier la sélection des points de repère des personnes présentant une DI en utilisant l'oculométrie. Les personnes avec une DI effectuent peu de déplacements au quotidien, que ce soit en dehors ou au sein de leurs quartiers d'habitation (Mengue-Topio & Courbois, 2011). Cette restriction des déplacements peut en partie être expliquée par des difficultés d'acquisition des connaissances spatiales. En effet, elles éprouvent des difficultés dans la sélection des points de repère (Courbois et al., 2012), l'apprentissage d'itinéraires (Mengue-Topio et al., 2011), mais aussi dans l'apprentissage de la configuration de l'environnement (Mengue-Topio et al., 2015). La sélection et la connaissance des points de repère influencent l'apprentissage des itinéraires et de la configuration (Siegel & White, 1975), ce qui en fait un objet d'étude important. Or, il a été montré que les personnes avec une DI sont capables de sélectionner les repères positionnés aux intersections, mais qu'elles ne sélectionnent pas toujours les repères aidants pour les déplacements (Courbois et al., 2012). Conjointement, l'observation d'un point de repère semble être un bon indicateur de sa mémorisation (Hamid et al., 2010), ce qui fait de l'oculométrie un outil pertinent pour étudier les difficultés de sélection des repères. Les environnements virtuels (EV) sont des mondes artificiels qui permettent une immersion pseudo-naturelle de l'utilisateur (Fuchs, 1996, cité par Lourdeaux, 2001). Les résultats mesurés lors de tâches de navigation spatiale en EV sont représentatifs des performances réalisées en conditions réelles, ce qui fait de ces outils une méthode fiable pour évaluer les déplacements (Jansen-Osmann & Berendt, 2002).

Nous avons ainsi à travers trois études en EV analysé la sélection des points de repère sous différentes dimensions. Une première étude de nature exploratoire a été réalisée afin d'étudier les temps d'observation des repères et de l'environnement ainsi que le processus implicite de prise de décision. Dans une seconde étude, nous avons étudié l'influence des points de repère balises et associatifs sur l'apprentissage ainsi que la capacité à sélectionner les repères balises préférentiellement. Enfin, dans une troisième étude, nous avons observé l'influence de la saillance perceptive des repères sur les capacités de sélection et d'apprentissage d'itinéraires.

Cette discussion synthétise les résultats des trois études dans l'objectif de répondre à la problématique de recherche générale (voir chapitre 3 du manuscrit). Pour cela, nous commencerons par rappeler les caractéristiques des situations expérimentales proposées aux participants. Nous aborderons ensuite les processus de prise d'informations et d'acquisition des connaissances spatiales. Une troisième partie sera dédiée au développement et l'apprentissage des stratégies de navigation, en abordant l'effet de l'apprentissage sur les stratégies de sélection puis la charge cognitive. Une quatrième partie sera dédiée au questionnement de l'oculométrie

pour l'étude des capacités de navigation des personnes avec une DI. Les principaux résultats seront ensuite déclinés en pistes d'adaptation des systèmes d'aide à la navigation et environnements urbains ainsi qu'en perspectives de prises en charge permises par ces travaux. Ce chapitre sera clos par les limites et perspectives de recherches.

1. Les environnements et stimuli : quelles ont été nos différentes manipulations expérimentales ?

1.1. Les points de repère

Les points de repère en raison de leurs caractéristiques influent sur les capacités de déplacement, qu'ils soient présentés en environnement virtuel ou réel. L'analyse de leur incidence sur les comportements oculaires et l'apprentissage d'itinéraires nécessite une étude approfondie des différentes variations possibles, telles que la couleur, la position, l'unicité, la stratégie qu'ils impliquent ou la familiarité, etc. Nous nous sommes appuyés sur les travaux Waller et Lippa (2007) pour étudier l'influence des différents types de repères ainsi que sur le modèle de Caduff et Timpf (2008) pour recenser une partie des variations sous l'angle de la saillance : perceptive, sémantique/cognitive et structurelle/contextuelle. En fonction de nos hypothèses, ces caractéristiques ont été contrôlées ou manipulées, pour étudier leur influence sur les comportements d'observation et d'apprentissage des participants avec et sans diagnostic de déficience intellectuelle.

Concernant les différents types de repère, nous avons fait varier la présentation des repères balises et associatifs (expérience 1 et 2). Pour la position des repères, nous nous sommes appuyés sur les travaux réalisés auprès de participants au développement typique, par Waller et Lippa (2007) pour la première expérience, et par De Condappa et Wiener (2016) pour la seconde expérience. Pour rappel, les repères balises impliquent un déplacement de proche en proche (« tourner du côté de la pharmacie »), tandis que les repères associatifs nécessitent un apprentissage de la direction et du repère (« à la pharmacie, je vais à droite »). Une première distinction entre les deux premières expériences de la thèse concernait la position des repères associatifs. Ainsi, les repères associatifs étaient pour la première expérience, deux repères distincts positionnés au centre de l'intersection, puis sont devenus, lors de la seconde expérience, deux repères identiques de part et d'autre de l'intersection. Cette distinction méthodologique a permis de concentrer les observations sur la stratégie employée et de réduire des biais méthodologiques liés à la position du repère, comme le biais d'observation central

(Buswell, 1935; Tatler, 2007). La seconde distinction concerne la présentation d'un seul type de repère (balise ou associatif) ou de plusieurs (balises et associatifs). Cette distinction, principalement réalisée lors de la seconde expérience, a permis d'étudier plus finement l'influence des capacités de sélection. Autrement dit, il a été question d'étudier la focalisation du regard sur un ou des types de repères (balise, associatif ou les deux), en lien avec la stratégie de l'individu (*top-down*) et les caractéristiques de l'environnement (*bottom-up*). Notons qu'il s'agit ici d'une simplification qui n'est pas représentative de l'entière des variables et interactions présentes lors d'un déplacement (émotions, anxiété, fatigue, bruit ambiant, météo ou luminosité, etc.). La troisième expérience, quant à elle, comprenait des repères de type balise (2 de part et d'autre du chemin), qui pouvaient être soit uniques ou non uniques. Cette expérience était davantage axée sur l'étude de la saillance perceptive et la sélection des repères uniques.

La saillance sémantique a été contrôlée dans les trois expériences. La première étude a utilisé des repères représentant des objets couramment rencontrés. Les deux autres études comprenaient quant à elles des repères jugés et évalués comme « sémantiquement similaires » lors de la construction du protocole. Comme énoncé par Ligonnière (2021) et Hamburger et Röser (2014), la saillance cognitive et/ou sémantique est une variable propre à chaque sujet qui peut être cependant partagée par les individus (une enseigne de magasin par exemple). Ainsi, nous avons fait le choix de contrôler la saillance sous l'angle de la familiarité et d'accord d'image, en nous appuyant sur la base d'image de Bonin et al. (2020).

La saillance perceptive a quant à elle été étudiée sous diverses formes. Nous avons étudié son influence sur les durées d'observation dans l'étude 1 (*saliency map*), puis nous l'avons contrôlée dans l'étude 2 pour éviter qu'elle n'influe sur les comportements de sélection. Dans l'expérience 3, nous l'avons fait varier en se basant sur la technique du « *Graph-Based Visual Saliency* » (Harel et al., 2007). L'expérience 3, inspirée des travaux de Grzeschik et al. (2019), a été l'occasion d'étudier finement l'influence de la saillance visuelle sur l'observation des repères, mais a aussi permis de manipuler son influence (positive et/ou négative) sur l'apprentissage d'itinéraires.

1.2. Le design visuel et expérimental des environnements virtuels

Les trois environnements virtuels ont été inspirés des travaux existants, que ce soit pour le design visuel, le nombre d'intersections, le mode de présentation (aléatoire ou non) et le nombre d'essais (Armougum et al., 2019; Chan et al., 2012; Courbois, Farran, et al., 2013; R. Davis,

2021; De Condappa & Wiener, 2016; Farran, Courbois, Van Herwegen, Cruickshank, et al., 2012; Farran et al., 2016; Geisen et al., 2021; Grzeschik et al., 2019; Ligonière, 2021; Mengue-Topio et al., 2011; N’Kaoua et al., 2019; Waller & Lippa, 2007). La première étude a permis d’explorer les comportements visuels dans une représentation d’environnement extérieur (ciel bleu, sol marron et mur en briques rouges), tandis que les expériences 2 et 3 ont étudié les déplacements dans un environnement intérieur (fond noir, sol marron et briques rouges) (voir Figure 37). Outre le souhait d’évaluer la répliquabilité des résultats obtenus par les auteurs, les environnements virtuels des 2 dernières expériences ont été choisis également pour leur nature épurée. Nous avons ainsi pu mesurer la dilatation pupillaire dont on sait qu’elle est fortement influencée par la couleur et la luminosité des stimuli présentés (Klingner et al., 2008). Notons au passage que la nature épurée et contrôlée des EV a pu être interprétée comme austère pour certains participants ou évoquer des jeux vidéo existants pour d’autres.

Figure 37. Rappel des trois environnements virtuels



Le nombre d’intersections était différent entre les environnements virtuels présentés. Le premier EV, que nous pouvons qualifier ici de long, était composé de 12 intersections, le second EV était quant à lui composé de 8 intersections et le dernier EV de 4 intersections. Le nombre a été choisi en fonction des variables que nous souhaitions évaluer et a aussi été réduit au fil des expériences pour s’adapter aux capacités cognitives des personnes avec une déficience intellectuelle. À titre d’exemple, le nombre de 8 intersections a été choisi en référence aux capacités de mémoire de travail (8 informations). Par ailleurs, les intersections étaient présentées dans le même ordre en phase de visionnage et en phase de réponse dans les deux premières expériences, et dans un ordre aléatoire dans la dernière expérience. Cette variation a ouvert des questionnements sur l’influence de la séquence dans l’apprentissage, ainsi que sur les capacités de sélection des points de repère sans cette influence (voir Geisen et al., 2021; Grzeschik et al., 2019; Lingwood et al., 2020). Les modalités de réponse étaient également

différentes entre les trois expériences (droite et gauche pour l'expérience 1 et 2 ; droite, gauche et tout droit pour l'expérience 3).

Enfin, le nombre d'essais était différent entre les deux premières expériences (10 essais) et la dernière (5 essais). Au départ, le nombre d'essais était élevé pour pouvoir analyser les stratégies d'apprentissage et leur évolution au fil des essais. Néanmoins, une réduction de ce nombre a été réalisée pour la troisième expérience pour réduire le temps de passation, éviter un sentiment d'échec chez les participants et minimiser également un désinvestissement ou découragement envers la tâche.

1.3.L'environnement de passation

L'environnement de passation a également été conçu pour être adapté aux participants et pour contrôler certaines variables. Les consignes ont été présentées en langage simplifié (format similaire au Facile à Lire et à Comprendre) et des pauses ont été régulièrement réalisées. Les passations des participants du groupe DI ont été conduites en 2 temps. La lumière dans la pièce a été maintenue constante lors des deux expériences relatives à la dilatation pupillaire. Chaque participant a été rencontré au préalable lors de la présentation de l'étude et recueil de consentement en langage simplifié. Des feedbacks verbaux positifs ont été donnés tout au long des expériences en parallèle des feedbacks donnés par l'écran. Un moment d'échange a été effectué avec les participants au début et à la fin de chaque passation pour qu'ils puissent évoquer leurs interrogations, ressentis, commentaires et recommandations d'amélioration sur la passation.

2. Observer l'environnement, acquérir des connaissances spatiales

Les résultats seront discutés en deux temps. Nous aborderons dans une première partie les résultats relatifs au premier visionnage de l'itinéraire, puis dans une seconde partie les résultats du premier et dernier essai de la phase de réponse.

2.1.La découverte de l'itinéraire : comment se déroule la prise d'informations en phase de visionnage ?

2.1.1. L'observation des repères et de l'environnement

La première et la dernière étude ont permis de mettre en évidence un temps d'observation plus faible des points de repère de la part des personnes avec une DI en comparaison avec les

participants au développement typique pendant la phase de visionnage. Ces résultats vont dans le sens de ceux de Farran et al. (2016) qui montrent un temps inférieur à observer les repères chez les personnes avec un syndrome de Williams. Or, étant donné que l'observation d'un repère est en lien avec sa mémorisation (Hamid et al., 2010), il est raisonnable de penser que cette durée plus faible d'observation influence directement l'apprentissage des points de repère. Il est possible que cette différence soit due aux capacités attentionnelles des personnes avec une DI (Merrill, 2006) qui auraient plus de difficultés à focaliser leur attention sur les repères, ce qui mènerait à une observation plus diffuse de l'environnement. Il est également possible que cette différence soit le signe d'une stratégie basée sur d'autres éléments que les repères, comme par exemple, la mémorisation de la séquence des directions (gauche, gauche, droite, etc.).

2.1.2. L'influence de la saillance perceptive

La saillance perceptive d'un point de repère est déterminante pour sa sélection. Selon certains travaux, les processus de bas niveau (*bottom-up*) seraient altérés chez les personnes avec une DI. Selon Carlin et al. (1995), la perception de la taille et de la forme serait moins efficiente, mais la perception de la couleur serait préservée. Dans le même sens, Boot et al. (2012) émettent l'hypothèse d'une altération des processus de bas niveau impliqués dans la création d'une carte de saillance interne chez les enfants et/ou adolescents présentant une DI. La sensibilité et l'aide potentielle apportée par la saillance visuelle des points de repère ont ainsi été testées lors de la première et troisième étude.

Que ce soit pour la première ou la troisième étude, les participants avec une DI observent plus longtemps les repères saillants plutôt que non saillant, ce qui montre que leur système visuel a pu générer une carte de saillance dans les conditions expérimentales que nous avons créées. Dans l'expérience 3, la sensibilité à la saillance à la toute première présentation des stimuli est même spécifique à ce groupe, puisque les temps de fixation varient peu dans le groupe DT. L'écart entre nos résultats et ceux de Boot et al. (2012) vient probablement du fait que nous avons travaillé avec des adultes et que nous avons majoritairement utilisé la couleur pour augmenter la saillance des stimuli (Carlin et al., 1995).

2.1.3. L'influence des différents points de repère

2.1.3.1. Repères associatifs et balises (congruents et incongruents)

Dans la première expérience, les stimuli associatifs qui étaient placés au centre de l'écran étaient regardés plus longtemps que les stimuli balises. Nous avons interprété cet effet par la tendance naturelle qu'ont les humains à fixer le centre d'une scène visuelle (Tatler, 2007). Cette

tendance serait d'ailleurs accentuée chez les personnes avec une DI (Carlin et al., 2003), ce qui peut avoir accentué l'écart entre le temps alloué aux repères balises et associatifs. Ces résultats montrent l'importance de la position des repères et mettent en avant la nécessité de contrôler cette variable.

En dépit de ce biais d'observation central, la première expérience a permis d'étudier l'observation des repères congruents et incongruents avec la direction à emprunter. Les participants présentant une DI n'observent pas durant plus de temps l'un ou l'autre de ces repères. À l'inverse, les résultats des participants du groupe DT sont conformes à ceux obtenus par De Condappa et Wiener (2016) et montrent une observation préférentielle du repère congruent avec la direction. Concernant la différence entre les groupes, les participants au développement typique observent durant deux fois plus de temps les repères congruents avec la direction, en comparaison avec les participants avec une DI. Il est important de noter que l'on ne relève pas de différence significative entre les groupes lorsqu'il s'agit des repères incongruents.

Ainsi, les participants du groupe DT mettent en place une stratégie de sélection peu coûteuse cognitivement dès la phase de visionnage de l'itinéraire (repères congruents), bien que l'attention visuelle soit majoritairement régie par la position centrale de certains repères (*processus bottom-up*). Les participants du groupe DI ne semblent pas mettre en place une stratégie de sélection basée sur les balises (*processus top-down*) lors du premier visionnage. Ils sont en revanche influencés par la position centrale des stimuli, ce qui résulterait plutôt de *processus bottom-up*.

2.1.3.2. Repères uniques et non uniques

Utiliser des repères non uniques (répétés plusieurs fois) lors de l'apprentissage d'un itinéraire peut induire le participant en erreur. Les résultats montrent que l'observation des repères uniques et non uniques, au moment où le participant prend connaissance de la répétition du repère (c'est-à-dire la seconde rencontre), est influencée par le groupe et la saillance. Les participants du groupe DT déploient très rapidement une stratégie de sélection basée sur l'utilisation des repères uniques lors de la seconde rencontre, en diminuant le temps alloué aux repères non uniques au profit des repères uniques. Dans ce groupe, les temps de fixation alloués aux repères sont très peu, voir pas influencés par la saillance perceptive.

Les participants du groupe DI semblent initier le même type de stratégie, mais celle-ci est moins prononcée et se trouve être influencée par la saillance perceptive. À l'occasion de la seconde

rencontre, les participants diminuent le temps passé à observer les repères non uniques, exclusivement s'ils sont saillants. Ceci suggère que la saillance visuelle les aide à identifier le caractère non unique du repère. Cet effet s'accompagne d'une augmentation de la durée d'observation du repère unique non saillant qui est associé. Ainsi, une fois le caractère non unique identifié grâce à la saillance, les personnes avec DI mettraient naturellement en place la stratégie qui consiste à observer plus longtemps le repère unique. En relation avec les difficultés de sélection des repères soulevées par les recherches antérieures (Courbois et al., 2012; Farran et al., 2016; Mengue-Topio et al., 2020), nous nous attendions à ce que la sélection des repères uniques s'opère pendant l'apprentissage. Ces résultats très encourageants indiquent que les caractéristiques visuelles des repères peuvent faciliter l'émergence de processus de sélection.

2.1.4. Conclusion

En conclusion, les participants avec une DI observent moins les repères que les participants avec un DT lors de la phase de visionnage d'itinéraire et consacrent plus de temps à l'observation de l'environnement (mur, sol et plafond). Les participants du groupe DT mettent en place dès cette phase une stratégie de sélection facilitatrice pour l'apprentissage, en observant davantage les repères congruents avec la bonne direction et les repères uniques. Les participants avec une DI réagissent plus à la saillance perceptive des repères que ceux du groupe DT. Il semblerait même que la saillance leur permette de mieux identifier les repères non uniques ce qui leur permettrait, en retour, de mettre en place une stratégie facilitatrice.

2.2. La phase de réponse et d'apprentissage

Après le visionnage, les participants ont entamé la phase d'apprentissage qui implique l'observation de l'EV, la prise de décision, l'émission d'une réponse motrice sur le clavier, le traitement du feedback visuel relatif à la justesse de la réponse et éventuellement une correction de la réponse. Les différentes étapes de la séquence sont réalisées plus ou moins facilement d'un participant à l'autre en fonction de l'aisance avec les EV, des capacités de mémorisation des itinéraires, des choix stratégiques, etc. Il faut aussi préciser que pendant cette étape peuvent intervenir des processus de consolidation relatifs à la mémorisation de la consigne ou des facultés motrices propres à l'utilisation de l'ordinateur. Nous allons dans cette partie discuter les résultats obtenus lors du premier et dernier essai des expériences.

2.2.1. L'apprentissage au fil des essais

Conformément aux précédentes études réalisées auprès des personnes avec une DI (Farran et al., 2015; Mengue-Topio et al., 2011; Purser et al., 2015), les participants font lors des trois

études un nombre plus important d'erreurs. On observe également une variation du nombre d'erreurs entre les participants plus importante dans le groupe DI, ce qui montre une hétérogénéité dans les performances d'apprentissage d'itinéraires au sein de ce groupe (voir aussi Letalle, 2017; Mengue-Topio et al., 2011). Concernant le nombre d'essais, les participants présentant une DI ont besoin de plus d'essais pour parvenir au critère d'apprentissage, mais ils apprennent (voir aussi Farran et al., 2015; Mengue-Topio et al., 2011; Purser et al., 2015). La grande majorité des participants font effectivement moins d'erreurs au fil des essais, même si certains d'entre eux ne parviennent pas à apprendre l'itinéraire, ce qui souligne l'importance de l'accompagnement individuel et de l'adaptation des situations aux capacités de chacun (Mengue-Topio et al., 2020).

On observe aussi que le biais de regard est précoce à l'occasion du dernier essai dans le groupe DI alors qu'il l'est dès le premier essai pour le groupe DT (observation dans le sens de la direction qui sera prise). Nous avons interprété la précocité de ce biais comme le signe d'une anticipation de la prochaine direction à emprunter, avant même l'arrivée au niveau de l'intersection (Geisen et al., 2021). Si notre interprétation est correcte, cela montrerait que cette anticipation ferait, elle aussi, l'objet d'un apprentissage dans le groupe DI.

2.2.2. Les différences d'observation des repères et de l'environnement

Les différences d'observation des repères entre les groupes varient en fonction de l'étude. Dans l'étude 1, la condition avec l'ensemble des repères de l'étude 2 et l'étude 3, les participants du groupe DI observent durant moins longtemps les repères que les participants du groupe DT. Les participants du groupe DI ont donc tendance à moins s'appuyer sur les repères pour formuler leur réponse, malgré l'absence de contrainte de temps. En revanche, dans l'expérience 2, il n'y a pas de différence entre les deux groupes vis-à-vis du temps dédié à l'observation des repères lorsqu'un seul type de repère est présent (balise ou associatif). Tout ceci laisse à penser que le nombre de repères influence la prise d'information. Ce point sera discuté plus en détail dans la partie relative aux différents types de repères.

2.2.3. L'effet de la saillance visuelle

L'influence de la saillance visuelle des points de repère a été mesurée dans la première étude et manipulée lors de la troisième étude. Le design de l'environnement virtuel de la seconde et troisième étude était également conçu pour que les zones contenant les repères soient plus saillantes que l'environnement (mur, sol et plafond).

Dans la première étude, on relève un lien entre la saillance des repères et le temps passé à les observer dans les deux groupes. Plus les repères sont saillants visuellement, plus ils sont regardés. On peut noter que la force d'association entre la saillance visuelle et la durée d'observation semble plus élevée dans le groupe DI. Dans la troisième étude, les participants devaient mémoriser des routes où les repères aidants pour l'apprentissage (repères uniques) étaient visuellement saillants et, inversement, des routes où les repères non-aidants (repères non uniques) étaient saillants. Les participants du groupe DT, répondaient plus rapidement et avaient besoin de moins d'essais pour apprendre le trajet lorsque les repères aidants étaient saillants. Concernant les participants du groupe DI, il n'y avait pas de différence significative entre les deux types d'itinéraires. En revanche, les temps de réponse étaient plus faibles lorsque les repères aidants étaient saillants. Il semblerait donc que la saillance visuelle facilite le traitement attentionnel (réponse plus rapide) sans pour autant améliorer l'apprentissage chez les personnes avec DI, alors que c'est le cas dans le groupe DT. Ce résultat ne permet pas de confirmer celui obtenu par N'Kaoua et al. (2019) qui montraient une amélioration des performances en navigation spatiale lorsque les repères étaient en surbrillance. Néanmoins, il montre l'aspect facilitateur de la saillance visuelle sur la vitesse de traitement (rapidité de réponse).

Si la saillance perceptive ne semble pas influencer directement les performances d'apprentissage des participants avec une DI, elle semble faciliter la sélection des repères. Dans l'étude 3, les participants du groupe DI observent dans un premier temps les repères sur des critères de saillance perceptive (phase de visionnage), et lors des essais commencent à mettre en place une stratégie d'observation basée sur l'unicité des repères, qui se prononce avec la répétition des essais. On peut supposer que la saillance perceptive les a aidés à identifier le caractère unique ou non unique des repères en attirant leur attention directement sur ceux-ci, pour leur permettre ensuite de développer leur stratégie de sélection.

2.2.4. L'effet des différents types de repères

2.2.4.1. Les repères uniques et non uniques

L'influence des repères uniques et non uniques sur l'observation et l'apprentissage d'itinéraire a été testée lors de la troisième expérience de thèse. Dès le premier essai, les participants des deux groupes observent davantage les repères uniques, plutôt que non uniques, ce qui signe la mise en place d'une stratégie de sélection efficace après une seule exposition à l'itinéraire. Les

mêmes résultats sont relevés lors du dernier essai, ce qui montre le maintien de cette stratégie au fil des essais par les deux groupes.

En conclusion, les participants du groupe DT et DI mettent en place des stratégies similaires de sélection des repères uniques et non uniques lors de la phase de réponse. Il est possible que les résultats obtenus auprès des personnes avec une DI dans la littérature (Courbois et al., 2012) soient influencés par d'autres variables telles que le nombre d'intersections à mémoriser, les caractéristiques visuelles de l'environnement, mais aussi l'ensemble des éléments relatifs aux sens (odorat, ouïe, etc.) en condition de déplacement réel. On note la mise en place de cette stratégie de sélection dans le groupe DI dès le premier essai alors qu'elle ne semblait pas être présente en phase de visionnage pendant laquelle l'exploration était guidée par la saillance perceptuelle. Malgré ces éléments, les routes aidantes (repères uniques et saillants perceptuellement) ne semblent pas bénéfiques pour l'apprentissage d'itinéraires, même si elles diminuent le temps de réponse.

2.2.4.2. Les repères associatifs et balises (congruents et incongruents)

L'influence des repères balises et associatifs sur le nombre d'erreurs réalisées a été évaluée dans l'étude 2. Les résultats recueillis auprès des personnes au développement typique ne permettent pas de retrouver les résultats de Waller et Lippa (2007). Elles ne font pas moins d'erreurs en apprenant des itinéraires composés de balises, mais ceci peut s'expliquer par un effet plafond. Concernant le groupe DI, les participants font moins d'erreurs lorsqu'ils apprennent un itinéraire composé uniquement de repères balises en comparaison avec un itinéraire composé uniquement de repères associatifs. Cette étude est la première à montrer l'effet bénéfique des repères balises sur l'apprentissage d'itinéraires chez les personnes avec une DI. Cet effet s'explique par le nombre et type d'informations encodées lors de l'apprentissage (Waller & Lippa, 2007). Les repères associatifs demandent effectivement de mémoriser l'association entre une direction et un repère, tandis que les repères balises impliquent uniquement la mémorisation du repère. L'apprentissage réalisé est analogue à une tâche de reconnaissance tandis que l'apprentissage avec les repères associatifs correspond à une tâche de rappel indicé. Une revue de la littérature portant sur la mémoire explicite des personnes avec une DI (Lifshitz-Vahav & Vakil, 2014) a montré qu'elles avaient des difficultés lors des tâches de rappel, alors que leurs capacités pouvaient être relativement préservées lors de tâches de reconnaissance (voir aussi Courbois & Facon, 2014). Les performances obtenues lors de l'apprentissage des itinéraires composés uniquement de repères balises sont donc en adéquation avec les capacités de mémorisation soulignées dans la littérature.

Les temps de fixation des repères balises ou associatifs concordent avec les performances relevées. Il n'y a pas de différence entre les deux groupes vis-à-vis du temps alloué aux repères balises ou associatifs pendant la phase de réponse (premier et dernier essai). Ce résultat qui diffère des études antérieures (étude 1 et Farran et al., 2016) montre qu'en contrôlant certaines variables, la sélection visuelle des repères ne diffère pas entre les deux groupes. Les conditions qui pourraient ainsi faciliter la sélection des repères seraient : (1) la présentation d'un seul type de repère, (2) la saillance perceptive de ces repères et (3) un environnement épuré. Ces conditions ont ainsi contribué aussi au faible nombre d'erreurs réalisées par les participants avec DI lorsqu'ils apprenaient un itinéraire composé de repères balises.

Qu'en est-il lorsque les participants doivent apprendre un itinéraire composé des deux types de repères présentés simultanément ? Dans cette situation, on voit clairement les participants du groupe DT orienter leur attention vers les repères balises, dès le premier essai. Chez les personnes avec DI, bien que l'utilisation d'une stratégie de type « balise » soit possible, elle n'est pas clairement mobilisée dans cette situation. De plus, le nombre d'erreurs dans cette condition est supérieur à celui de la condition balises. Ce résultat est très intéressant, car il montre que le simple fait d'ajouter des éléments dans une scène, sans nécessairement accroître la complexité de la tâche, augmente le niveau de difficulté. Il témoigne aussi de la difficulté à sélectionner les repères les plus aidants et de son impact sur les performances d'apprentissage. Les personnes avec DI ont des difficultés à mobiliser des stratégies qu'elles utilisent pourtant spontanément dans d'autres circonstances (condition balises). Ainsi, l'ensemble de ces résultats montre l'importance d'apprendre aux personnes avec une DI à sélectionner les repères balises lors de leurs déplacements pour améliorer l'apprentissage.

La notion de congruence avec la direction a été testée dans les expériences 1 et 2 pour les repères balises. Il s'agit des repères positionnés sur le chemin à emprunter en opposition aux repères incongruents qui sont positionnés à l'entrée du mauvais chemin. Lorsque seuls les repères balises sont présents (étude 2) les participants des deux groupes observent davantage les repères congruents avec la direction à emprunter, et ce dès le premier essai. Lorsque les deux types de repères sont présents (étude 1 et 2), les résultats varient en fonction de l'expérience. Pour l'expérience 1, les participants du groupe DT observent davantage les repères congruents dès le premier essai tandis que les participants du groupe DI mettent progressivement en place une stratégie et observent davantage les repères congruents lors du dernier essai. Pour l'expérience 2, il n'y a pas de différence concernant le temps passé à observer les repères congruents ou non

congruents dans les deux groupes. Le nombre de repère et leur position semble donc influencer le temps alloué aux repères congruents.

2.2.5. Conclusion

En conclusion, les participants des deux groupes semblent dans l'ensemble mettre en place des stratégies similaires de sélection, mais à des temps de mesure différents. L'environnement virtuel, le type et nombre de repères présents ainsi que les caractéristiques perceptives de ceux-ci influent différemment sur les capacités d'apprentissage d'itinéraires des participants en fonction des groupes. Ainsi, les participants du groupe DT semblent peu ou pas influencés par ces variables en raison de la mise en place d'une stratégie de sélection dès le premier essai, basée sur des processus *top-down* qui permet d'encoder l'information pertinente. Tandis que les participants du groupe DI semblent dans un premier temps adopter une posture de découverte de l'environnement avec une observation davantage régie par les caractéristiques visuelles de l'EV et des repères (processus *bottom-up*). Cependant, lorsque l'environnement et les repères sont propices à la mise en place d'une stratégie, alors les participants émettent plus rapidement une stratégie de sélection ajustée à leur apprentissage. Lorsque cela n'est pas le cas, la stratégie de sélection émerge au fil des essais.

3. Comment se manifeste l'apprentissage ?

3.1. Regarder les stimuli pertinents ou diminuer le temps alloué aux stimuli non pertinents ?

Lors des trois études, les participants disposaient de plusieurs essais pour réaliser l'itinéraire en essayant de faire le moins d'erreurs possibles, ce qui nous a permis d'évaluer l'effet de la répétition des essais sur les comportements oculaires.

Lors de la première expérience, on remarque que les participants du groupe DI ont tendance à diminuer au fil des essais le temps passé à observer les repères incongruents avec la direction. Lors de la seconde expérience, lorsque l'ensemble des repères sont présents, ils observent durant moins longtemps les repères associatifs lors du dernier essai en comparaison avec le premier essai. Il est à noter que dans cette même expérience, lorsqu'uniquement les repères balises sont présents, ils diminuent également le temps passé à observer les repères balises (qu'ils soient congruents ou incongruents). Enfin, lors de la troisième expérience, les participants regardent moins longtemps les repères non uniques (saillants et non saillants) lors

du dernier essai en comparaison avec le premier essai. L'ensemble des résultats recueillis suggèrent qu'avec l'apprentissage, les participants avec une DI regardent moins longtemps les repères moins pertinents pour la stratégie qu'ils mettent en place. Dans ce contexte, apprendre consisterait plus à inhiber les stimuli non pertinents qu'à sélectionner les stimuli pertinents. En ce sens, les repères non pertinents interféreraient de moins en moins avec la mobilisation d'une stratégie efficace qui, nous l'avons montré, est mobilisée spontanément lorsque la situation le permet (expérience 2 : repères balises présentés seuls). Les analyses de corrélation lors du dernier essai de l'expérience 1 vont dans ce sens. La corrélation entre erreurs et temps passé à observer les repères incongruents, montre un lien entre l'observation des repères non pertinents et le nombre d'erreurs. Ainsi, plus les participants observent les repères non congruents plus ils effectuent d'erreurs. Néanmoins, il s'agit ici d'une interprétation des résultats qui nécessiterait la réalisation de recherches ultérieures. La diminution du temps passé à observer les repères est présente également dans le groupe DT, mais ne concerne pas spécifiquement les repères non pertinents.

Ainsi, l'apprentissage d'itinéraire et la sélection des repères ne s'opèrent pas à la même vitesse et de la même manière dans les deux groupes. Les participants du groupe DT émettent dès la phase de réponse une stratégie de sélection des repères qui perdure avec la répétition des essais (processus *top-down*). Les participants du groupe DI ont une observation guidée par les propriétés perceptives de l'environnement et des repères (processus *bottom-up*), qui au fil des essais laisse place à une stratégie plus adaptée, basée sur la diminution du temps alloué aux repères non pertinents (processus *top-down*).

3.2. La dilatation pupillaire associée à l'apprentissage d'itinéraires

L'apprentissage d'un itinéraire engendre un coût cognitif en fonction des éléments à mémoriser, de la consigne et du support d'apprentissage proposé. Pour mieux identifier les éléments qui influent sur le niveau de charge cognitive, la dilatation pupillaire a été étudiée lors de la seconde et troisième étude.

D'après Kahneman et Beatty (1966), la dilatation pupillaire augmente lorsque la difficulté de la tâche augmente. Dans le contexte de la navigation, plusieurs auteurs ont montré que la dilatation pupillaire augmentait avec la difficulté de la tâche spatiale et la complexité de la stratégie de navigation utilisée (De Condappa & Wiener, 2016; Mueller et al., 2008). Ils ont aussi montré que la dilatation pupillaire diminuait au fil des essais, ce qui serait le signe d'un apprentissage. Notons cependant que la dilatation pupillaire est une variable sensible à de

nombreux facteurs environnementaux (luminosité) et individuels (émotions, fatigue, etc.), ce qui en fait une mesure à interpréter avec précaution, notamment lorsqu'elle est associée à la théorie la charge cognitive.

Dans la deuxième expérience, les itinéraires nécessitaient de retenir 8 directions associées ou non à des repères (balises, associatifs ou les deux). Ces repères pouvaient induire différentes stratégies de mémorisation et, par hypothèse, nous nous attendions à ce que la charge cognitive soit moins importante pour les repères balises que pour les repères associatifs (De Condappa & Wiener, 2016). Nos résultats ne permettent pas de montrer une différence significative entre les conditions au sein des deux groupes. Pour le groupe DT, il est possible que l'absence de différences soit due au niveau de difficulté de la tâche, qui serait ici trop simple pour les participants. Ils ont réalisé un très faible nombre d'erreurs dans l'ensemble des conditions, ce qui évoque un faible niveau de charge cognitive dans les quatre conditions. S'agissant des personnes avec une DI, elles ont effectué un nombre d'erreurs significativement différent entre les conditions, qui pourtant ne se traduit pas par des variations dans la dilatation pupillaire. On peut cependant se demander si cette absence de variation ne serait pas liée au protocole de mesure de la dilatation pupillaire. La dilatation a été mesurée en soustrayant, à chaque intersection, le niveau de dilatation avant l'apparition des repères avec le niveau pendant la réponse. Or, les différentes intersections sont toujours présentées dans le même ordre, laissant ainsi la possibilité aux participants d'anticiper la prochaine direction à emprunter (comme le suggèrent les données issues du biais de regard dans l'expérience 1). Si cela est le cas, le niveau de charge cognitive de la mesure de base serait déjà élevé, ce qui pourrait expliquer l'absence d'augmentation au moment de la réponse.

Cette limite a été prise en compte lors de la conception de la troisième expérience. La dilatation pupillaire a été comparée lors de l'apprentissage de routes qualifiées comme aidantes (repères uniques saillants) et non-aidantes (repères non uniques saillants), mais les intersections étaient dans ce cas présentées dans un ordre aléatoire. La dilatation pupillaire était plus importante pour les routes non-aidantes, mais cela ne se produisait pas à tous les essais. Chez les participants du groupe DT, elle était plus élevée à l'occasion du premier essai uniquement. Pour le groupe DI, la différence se manifestait uniquement lors du dernier essai. Les résultats du groupe DT vont dans le sens des études antérieures portant sur le lien entre l'augmentation de la dilatation pupillaire et la difficulté de la tâche spatiale (De Condappa & Wiener, 2016; Mueller et al., 2008). Les nombres d'erreurs et d'essais sont effectivement plus élevés dans la condition de routes non-aidantes. Concernant le groupe DI, les résultats vont également dans ce sens, mais

semblent se dessiner plus tardivement (dernier essai). Ces résultats pourraient s'expliquer par un engagement progressif dans la tâche, ce qui va dans le sens des résultats relevés vis-à-vis de la mise en place tardive d'une stratégie de sélection des repères et de l'effet de la répétition sur la dilatation pupillaire. Notons cependant qu'ils ne concordent pas totalement avec les performances d'apprentissage (nombres d'erreurs et d'essais), hormis pour les temps de réponse. Les résultats de l'étude 3 sont aussi à mettre en lien avec les processus d'inhibition. Les routes non-aidantes impliquent que les participants inhibent les repères saillants perceptivement pour apprendre les repères non saillants, ce qui n'est pas le cas pour les routes aidantes. Dans les deux groupes, la dilatation pupillaire et le temps de réponse sont plus importants lors des routes impliquant des processus d'inhibition (routes non-aidantes), ce qui est conforme aux résultats relevés par Laeng et al. (2011) lors d'une tâche de Stroop. Concernant l'évolution de la dilatation pupillaire au fil des essais, les résultats ne vont pas dans le sens de ceux relevés dans la littérature (De Condappa & Wiener, 2016; Mueller et al., 2008). La dilatation pupillaire augmente pour les routes non-aidantes dans le groupe DI et augmente pour les routes aidantes dans le groupe DT.

La dilatation pupillaire a très peu été étudiée auprès des personnes avec une DI, néanmoins une étude à ce sujet menée auprès de personnes avec une trisomie 21 a montré une dilatation pupillaire plus importante lors de la réalisation d'une tâche de détection de cible en comparaison avec des participants au développement typique (Angulo-Chavira et al., 2017). L'ensemble des résultats recueillis ne vont pas dans le sens de cette étude. Dans la deuxième expérience, il n'y a pas de différence significative entre les groupes concernant la dilatation pupillaire, hormis pour un itinéraire. Dans la troisième expérience, la dilatation pupillaire est plus faible chez les participants avec une DI en comparaison avec les participants du groupe DT. Ainsi, il était attendu que l'apprentissage d'itinéraire engendre un coût cognitif plus élevé chez les personnes avec une DI, mais il semblerait que l'inverse se produise. Davantage d'études seraient nécessaires pour confirmer la validité de la dilatation pupillaire comme indicateur du niveau de charge cognitive chez les personnes avec une DI, notamment en lien avec la présence ou non d'un syndrome génétique.

En conclusion, en lien avec les résultats et leur différence avec ceux relevés dans la littérature, bien que certaines variations aient du sens, nous ne pouvons interpréter pleinement la dilatation pupillaire comme indicateur de la charge cognitive dans ces deux études. Cet indicateur a été étudié à titre exploratoire et permet ainsi d'explorer certaines hypothèses explicatives liées aux différences d'apprentissage. Cependant, d'autres études et protocoles de mesures adaptés à la

navigation spatiale et la dilatation pupillaire sont nécessaires pour employer cette mesure comme indicateur fiable de la charge cognitive.

4. L'utilisation de l'eye-tracking pour l'étude la navigation spatiale auprès des personnes avec une DI

Le principal apport de ces travaux de thèse réside en l'utilisation de l'oculométrie pour mieux appréhender les difficultés de déplacements des personnes avec une DI. En dépit des obstacles énoncés par les précédents travaux ayant eu recours à cette technologie auprès des personnes avec une DI (Csákvári & Gyori, 2015), une quantité suffisante de données valides a pu être récoltée. En effet, l'utilisation d'un matériel qui a une bonne tolérance des mouvements de tête (système à double caméra) ainsi que la création d'un protocole adapté aux particularités attentionnelles (pauses, itinéraires de courte durée) a permis d'éviter une perte de données trop conséquente. Il est important néanmoins de souligner que l'utilisation de ce matériel n'est pas adaptée à l'ensemble des individus. En effet, les personnes ayant des troubles oculaires non corrigés n'ont pas pu prendre part aux expériences en raison des difficultés de calibration et de l'influence de ces troubles sur les résultats. Or, les troubles oculaires sont davantage présents chez les personnes présentant une DI (van Splunder et al., 2004), ce qui réduit le nombre de participants potentiels, mais a également pour effet de diminuer la représentativité des résultats. Il en est de même pour les personnes présentant une épilepsie de type photosensible, en raison du potentiel danger lié à l'utilisation du matériel. Or, tout comme les troubles oculaires, la présence de troubles épileptique est plus importante chez les personnes avec une DI (Robertson et al., 2015). L'utilisation de ce type de matériel implique donc d'interpréter les résultats en tenant compte de ce biais dans le recrutement des participants.

Les résultats ont permis d'identifier des comportements d'observation qui diffèrent de ceux des personnes au développement typique dès le premier contact avec l'environnement, mais dont les différences tendent à s'amenuiser au fil des essais. L'étude des durées de fixation a permis ainsi d'étudier la sélection des points de repère sans qu'influent les capacités de mémorisation ou de verbalisation des personnes. Dans la majorité des études, la sélection des points de repère s'étudie en demandant aux participants de nommer les repères qu'ils utilisent au cours du déplacement ou à l'aide d'un test de rappel ou reconnaissance des repères après l'apprentissage (Courbois et al., 2012; M. Davis et al., 2014; Farran, Courbois, Van Herwegen, & Blades, 2012). Le défaut de ces méthodes est qu'elles ne permettent pas d'isoler le processus de

sélection visuel de l'influence des processus mnésiques et verbaux. Or, ces deux derniers processus peuvent être altérés chez les personnes avec une DI. L'utilisation de l'oculométrie est donc davantage pertinente lorsqu'il s'agit de recueillir des données auprès des personnes présentant une DI. Une autre limite des méthodes de mesure de la sélection des repères est qu'elles fonctionnent en tout ou rien et qu'elles ne permettent pas d'évaluer l'importance relative des différents éléments constituant une scène. En effet, nos résultats montrent qu'il est rare qu'un repère ne soit pas observé, il est observé par la personne, mais de manière plus faible que les autres repères. Ainsi, l'oculométrie permet de quantifier le temps passé à observer un repère, ce qui donne l'occasion d'étudier plus finement la sélection, en évitant d'avoir uniquement recours à une appréciation binaire telle que « sélectionné/non sélectionné ». Cette méthode de recueil permet également d'apprécier l'évolution du comportement dans le temps (augmentation ou diminution des durées de fixation) et donc d'observer des phénomènes d'apprentissage qui n'auraient potentiellement pas été perçus. De surcroît, les données oculométriques permettent d'étudier l'influence des variables impliquées dans le processus de sélection telles que la saillance visuelle ou contextuelle qui peuvent dans certaines situations ne pas avoir suffisamment de poids pour influencer sur les performances d'apprentissage. Enfin, cette méthode a également permis d'étudier la prise de décision implicite (biais de regard) qui est difficilement mesurable par une autre méthode. En conclusion, l'oculométrie permet d'obtenir une capture plus précise de l'ensemble des processus en jeu dans la sélection des repères et dans l'apprentissage d'itinéraires, cependant cette méthode ne peut être appliquée à l'ensemble des individus, ce qui réduit la représentativité des résultats.

5. Quelles applications possibles ? Des systèmes d'aide à la mobilité à l'apprentissage de la mobilité

Les résultats de cette thèse ont permis de mettre en lumière des différences dans la sélection des points de repère qui peuvent être à l'origine des difficultés d'apprentissage d'itinéraires des personnes avec une DI. Concevoir des systèmes d'aide à la mobilité et des programmes d'apprentissage qui favorisent une meilleure sélection des repères peut être une piste importante d'amélioration de la mobilité.

5.1. Les systèmes d'aide à la mobilité : les GPS adaptés et les guides voyageurs

Les consignes de direction données par les GPS font souvent appel à des noms de rues et sont analogues à un apprentissage basé sur les repères associatifs (« Tourner à droite à la rue Gambetta »). Nos résultats suggèrent qu'il serait préférable de privilégier des consignes de direction basées sur des repères, notamment sur des repères balises (« Suivre la pharmacie »). Ce type de dispositif permettrait de faciliter le processus de sélection des repères utiles, de favoriser la mémorisation de l'itinéraire et d'accroître la confiance de l'utilisateur (May et al., 2003; Ross et al., 2004).

Hormis la consigne donnée, il convient de s'interroger sur les repères à intégrer dans les applications GPS. Raubal et Winter (2002) ont formulé une solution pour la population générale en proposant une méthode de calcul basée sur un score de saillance pour chaque point de repère (somme pondérée de la saillance perceptive, sémantique et structurelle). Grâce à nos résultats, nous pouvons suggérer des pistes d'adaptation de cette méthode aux personnes avec une DI. Le score de saillance global de chaque repère pourrait ainsi être davantage influencé par la saillance perceptive qui découle de capacités relativement préservées. Accorder un poids plus important à la couleur dont la perception semble la plus efficiente serait aussi conseillé. Cette adaptation du modèle de Raubal et Winter permettrait d'aboutir à une sélection automatique des repères plus adaptée au profil d'apprentissage des personnes avec une DI, et implantable dans une application GPS. En plus d'une sélection basée sur la saillance, il serait pertinent de privilégier les repères isolés (seuls sur l'intersection), uniques et de type balises.

Les commentaires des participants laissent aussi à penser que le choix de repères familiers pour la saillance sémantique serait un facteur d'aide. En lien avec les travaux réalisés sur la saillance sémantique et les repères familiers (Quesnot & Roche, 2015), il serait intéressant de proposer des réglages dans les applications GPS pour s'adapter à la familiarité qu'entretient l'individu avec l'environnement de déplacement. Ce type de fonctionnalité permettrait de s'adapter au lieu d'habitation de la personne et aux repères déjà utilisés et mémorisés. Par exemple, la demande de la personne pourrait être : « J'aimerais pouvoir me repérer par rapport au magasin où je réalise régulièrement mes courses ». Le contexte de déplacement (exploration libre ou guidée, activité sportive ou de loisir, etc.) pourrait aussi être intégré à ce type de système d'aide, étant donné son influence sur l'exploration de l'environnement et la mobilisation des ressources attentionnelles (Wenczel et al., 2017). Le fait de personnaliser individuellement les systèmes d'aide permettrait de favoriser le processus de choix chez les individus et ainsi accroître la motivation et l'autodétermination (Deci & Ryan, 1985, 2000).

À l'image des travaux réalisés par d'Arripe et al. (2023), Letalle et al. (2021) et Mengue-Topio et al. (2017, 2020), il serait intéressant d'ajuster l'adaptation des guides de transport et de voyage à ces travaux de recherche et aux besoins de chaque personne. En effet, le déplacement et sa logique ne sont pas de même nature en fonction du contexte (la différence entre une balade et un déplacement professionnel ou médical). Les guides pourraient, comme cela est déjà le cas pour certains, proposer des indications d'orientation se basant sur les repères connus (Lakehal et al., 2021) et saillants. Il s'agirait ici de ne pas partir du principe qu'un repère connu, l'est de tous et comprendre que la gare peut être un repère pour une personne se déplaçant en train, mais ne le sera pas pour une personne se déplaçant en voiture (voir d'Arripe et al., 2023 pour une recherche en mobilité faite par et pour les personnes avec une DI). Les guides pourraient ainsi en lien avec les travaux de thèse, se baser davantage sur des repères balises, congruents avec la direction, familiers ou connus, colorés et contrastés. L'utilisation du Facile à Lire et à Comprendre, aussi bien pour des questions de design visuel, d'accessibilité sémantique ou de conception (créé avec un groupe de personnes), serait ainsi primordiale pour concevoir ce type de guide tout comme pour la conception d'un GPS (proposant aussi des pictogrammes et fonctionnalités faciles à prendre en main).

Il est important de proposer différents types d'aides en raison des préférences de chacun, mais aussi en lien avec l'accessibilité à la technologie qui peut être difficile pour les personnes présentant une DI (Lussier-Desrochers et al., 2016). Il est ainsi important de permettre aux personnes d'avoir recours à des aides technologiques mobiles (téléphones, tablettes) et/ou fixes (ordinateur, bornes électroniques), des aides sociales (guichet avec des personnes ou contacts à joindre) ainsi qu'à des cartes et livrets en format papier. Il n'y a pas une solution d'accessibilité, mais une solution qui convient à une personne, à un instant défini. Une personne peut aimer se déplacer avec une carte ou un livret pour un déplacement (tourisme par exemple) et préférer un téléphone pour un autre (déplacement quotidien). L'objectif de ces recommandations est de donner le choix aux personnes entre tous ces supports et systèmes d'aide, qui se veulent au plus proches des besoins et demandes des personnes.

5.2. Les adaptations environnementales : l'environnement urbain

L'environnement urbain ou rural, de par ses caractéristiques, peut influencer les déplacements et les apprentissages. Ainsi, certaines pistes d'amélioration/aménagement de celui-ci en lien avec ces travaux de thèse peuvent être réalisées. En relation avec les résultats sur la saillance visuelle et les difficultés de lecture des noms de rue (Courbois et al., 2012; Mengue-Topio et al., 2020), il pourrait être intéressant de proposer des repères sous forme d'images contrastées

en termes de couleur pour indiquer les rues. À l'image des sentiers de randonnées, nous pourrions, par exemple, apposer des repères visuels à côté des noms de rues, pour qu'un apprentissage visuel soit possible, et ce même si les personnes ne sont pas lectrices. Ce type de dispositif pourrait aussi être un support d'apprentissage à la cognition spatiale pour les enfants au développement typique ou atypique. Un repère pourrait ainsi, à l'image de nombreux travaux et designs utilisés pour les environnements virtuels, se baser sur la saillance sémantique pour être facile à apprendre et contrasté (un arbre coloré sur fond blanc par exemple, ou autre coloris pour s'adapter aux spécificités visuelles). Ces repères seraient présentés, en s'inspirant des résultats sur la saillance structurale, de part et d'autre de l'intersection et permettraient ainsi un apprentissage de type balise congruent avec la direction à emprunter.

Dans l'environnement urbain, des travaux sont fréquemment réalisés. Ils ont pour effet de modifier les repères et itinéraires connus et routiniers de tout un chacun. Il serait ainsi important de réfléchir en amont aux potentiels aides que nous pouvons envisager pour faciliter cette transition urbaine. Comme nous l'avons énoncé, les systèmes GPS et les guides de transport adaptés sont deux premières pistes d'action possible. Il serait intéressant que ces dispositifs d'aide puissent prendre en compte les plans d'urbanisme annoncés pour que les nouveaux itinéraires soient réalisés et choisis en amont, pour éviter une potentielle anxiété liée à cette perte de repères et/ou à l'ajout de stimuli sonores et visuels conséquents. En effet, le bruit des travaux et l'ajout de stimuli visuels non uniques (barrière, plots, etc.), sont un grand nombre de stimuli nouveaux qui peuvent à certaines occasions générer une stimulation sensorielle trop importante. Ainsi, l'anticipation et l'adaptation des aides à ces éléments sont aussi des voies d'action importantes, ce qui est déjà bien connu et pratiqué par les personnes elles-mêmes, les familles et/ou amis et les professionnels.

5.3. Les prises en charge médico-éducatives : les remédiations et interventions éducatives

L'effet bénéfique de la répétition des essais chez les personnes avec une DI et la mise en place progressive d'une stratégie de sélection des repères montrent que ces éléments sont sensibles à l'apprentissage et peuvent donc faire l'objet de programmes d'entraînement et de remédiation cognitive axés sur différentes habiletés.

L'amélioration importante des performances d'apprentissage permises par les repères balises dans le groupe DI, en fait un axe de prise en charge à privilégier. Il serait judicieux de créer des programmes d'entraînement à la sélection de cette catégorie de points de repère en

environnement virtuel et/ou réel. Ces programmes pourraient comporter une suite d'exercices où sont présentés plusieurs types de repères avec des formes d'intersections différentes. La personne serait invitée à sélectionner le repère en cliquant sur celui-ci, puis recevrait un feedback explicatif sur le repère. Le nombre, le type et les formes d'intersections, pourraient augmenter en complexité au fur et à mesure des exercices en s'adaptant aux résultats que nous avons recueillis. À titre d'exemple, il pourrait s'agir au niveau 1 de sélectionner parmi 2 repères balises, le repère congruent avec la direction. Lors du niveau 2, les repères non uniques pourraient être ajoutés. Puis, lors du niveau 3, 4 repères dont les repères associatifs, pourraient être présents. L'intersection pourrait être en forme de T au départ, puis en croix, puis en étoile, ce qui permettrait aussi de faire varier le nombre de modalités de réponse directionnelles. Enfin, certains itinéraires pourraient faire varier la saillance perceptive des repères en présentant des routes aidantes ou non aidantes, en accentuant les propriétés visuelles des repères plus ou moins pertinents pour l'apprentissage (balises, uniques, congruents). Il serait aussi intéressant de faire varier les propriétés visuelles, sonores et de vitesse de déplacement des environnements (rue vide, rue avec mobilier urbain fixe ou mobile, rue avec bruits de voitures ou bruits de conversation d'autres piétons, etc.). Ce programme serait l'occasion pour les professionnels de travailler étape par étape ou de manière combinée, les différentes habiletés en s'adaptant au profil d'apprentissage de chaque enfant, adolescent ou adulte. Un programme de ce type, basé sur les EV, a été conçu en Suisse pour améliorer certaines de ces habiletés en classe avec des enfants âgés de 7 à 11 ans. Il a montré son efficacité pour la connaissance des points de repère (Linh Quang et al., 2023). Ces résultats encourageants vont dans le sens de la pertinence de développer ce type de programme et de l'étendre auprès des enfants et adultes présentant une DI.

Sans attendre le recours aux entraînements informatisés, certains professionnels ont déjà élaboré des techniques pour accompagner les personnes dans l'apprentissage et la réalisation d'itinéraires. Ils aident et accompagnent les personnes dans le processus de sélection des points de repère en amont pour qu'ils puissent ensuite réaliser l'itinéraire en s'appuyant sur des repères aidants (Mengue-Topio et al., 2020). Le fait d'encourager les personnes à utiliser les repères balises et saillants visuellement (surtout colorés) lors de la planification des trajets permettrait aux professionnels de faciliter l'apprentissage ultérieur en diminuant le nombre d'erreurs et le temps de décision à chaque intersection.

Les résultats recueillis grâce à l'oculométrie laissent à penser que les difficultés d'apprentissage d'itinéraires pourraient être en partie liées à un problème d'attention sélective (Merrill, 2006),

ce qui empêcherait les personnes avec une DI de focaliser leur attention sur les repères pertinents. En réponse à ces éléments, travailler les capacités attentionnelles pourrait être une piste pour améliorer la sélection des repères. Le travail de ces capacités pourrait être inclus dans un programme d'entraînement comme énoncé précédemment, mais pourrait aussi faire l'objet d'un programme spécifique. La création de jeux éducatifs virtuels ou non visant à apprendre à focaliser son attention sur les repères, intersections et directions d'un chemin pourrait être une manière ludique de travailler les habiletés spatiales. Les participants pourraient à l'occasion d'itinéraires simples, avoir pour consigne de focaliser leur attention sur les repères d'après un critère de couleur, de thème sémantique, de position, de nombre, etc. La consigne ne demanderait pas au participant de mémoriser le chemin, mais bien d'observer (et cliquer) sur les repères pour réussir la tâche. Tout comme le programme présenté précédemment, des variations sur les propriétés de l'environnement pourraient aussi être proposées. Ce type de programme pourrait aussi exister au format papier (images d'intersections) pour s'adapter au matériel disponible en structures et aux habiletés de chacun. Ainsi, des planches d'images et photos d'intersections seraient présentées et la personne devrait pointer du doigt le repère associé à la consigne. À l'image d'une tâche de détection de cible dans une scène visuelle, il s'agit ici d'adapter les tâches utilisées dans le domaine de la rééducation attentionnelle au contexte des déplacements. Enfin la dernière étape de ces programmes serait un travail de ces habiletés en condition réelle pour consolider et transférer les compétences d'apprentissage, ce qui peut être plus difficile à réaliser pour les personnes avec une DI.

En raison des dimensions cognitives et motrices impliquées par la navigation spatiale, le travail de ces habiletés en condition virtuelle et réelle peut aussi être l'occasion de développer des programmes d'entraînement pluridisciplinaires. Le travail de la verbalisation et compréhension des indications de direction et des repères peuvent être travaillés avec les orthophonistes, éducateurs spécialisés et enseignants. La rééducation attentionnelle peut être travaillée avec ces professionnels, ainsi qu'avec des orthoptistes. De même, au vu de la place importante tenue par les habiletés motrices dans les déplacements, travailler de concert avec les kinésithérapeutes, psychomotriciens et professeurs d'activités physiques et sportives permet de travailler l'ensemble des habiletés impliquées dans un déplacement piéton. Outre les dimensions cognitives, il est aussi important de prendre en compte les dimensions émotionnelles et sociales que peuvent impliquer les déplacements. Ces dimensions peuvent être travaillées avec un psychologue pour diminuer les potentielles anxiétés générées par la mobilité et améliorer les habiletés sociales spécifiques (Letalle et al., 2021; Mengue-Topio et al., 2017, 2020).

6. Limites des recherches

Ces travaux de thèse présentent plusieurs limites. La première limite concerne le fait que les résultats aient été recueillis en environnements virtuels. Certes, de nombreuses études ont montré que les résultats obtenus en environnements virtuels sont proches de ceux relevés en condition réelle (Jansen-Osmann & Berendt, 2002; Ruddle et al., 1997; Waller, 2000). Néanmoins, ils ne reproduisent pas l'entièreté des conditions relatives à un déplacement en condition réelle, telles que les comportements moteurs et les stimulations sensorielles. Ainsi, la réplication de ces études en condition réelle serait nécessaire pour confirmer les résultats.

Le caractère épuré des environnements virtuels peut également représenter une limite importante. Nous avons fait le choix de ce type d'environnement pour étudier uniquement la variable relative au type de points de repère, néanmoins, un déplacement implique d'autres variables telles que les piétons, les véhicules en mouvement ou les éléments du mobilier urbain. Ainsi, il pourrait être intéressant d'étudier la sélection des points de repère dans un environnement riche en stimulations visuelles plus proche d'un environnement urbain. Ces travaux permettraient d'étudier l'effet du nombre de points de repère sur les profils de réponses, et de différencier l'influence que peut avoir un environnement riche en détails d'un environnement riche en repères.

Il faut aussi rappeler l'hétérogénéité présente au sein des échantillons de ces trois études. Qu'il y ait situation de handicap ou non, les capacités de navigation spatiale varient d'une personne à l'autre pour de multiples raisons : l'effet de l'âge, de l'expérience vécue (quartier d'habitation, fréquence de déplacements), du sexe, de la mémoire, de l'attention, mais aussi de la manière dont une personne vit une situation d'apprentissage (anxiété de performance, motivation, etc.). Toutes ces variables n'ont pas pu être étudiées finement ou contrôlées dans nos recherches (pour une étude sur l'hétérogénéité des profils de déplacement, voir Courbois et al., 2024).

Nous avons fait le choix de comparer les résultats des participants avec une DI à des personnes de même âge chronologique. Ce choix a permis de mettre en avant des différences entre les groupes, mais ne permet pas de distinguer ce qui résulte d'un retard développemental ou d'un déficit spécifique. En effet, il a été montré que lorsque l'appariement est réalisé sur l'âge développemental, il y a peu ou pas de différences dans le nombre d'erreurs lors de l'apprentissage d'un itinéraire composé de repères présents aux intersections ou le long du chemin (M. Davis et al., 2014). Nous pouvons ainsi nous questionner sur le type de résultats

que nous aurions obtenu dans le cas d'un appariement sur l'âge développemental, notamment en fonction du type de point de repère proposé (associatif ou balise). D'autres études sont prévues dans ce sens, mais étant donné le caractère exploratoire de ce type de recherche, il était préférable de débiter par une comparaison basée sur l'âge chronologique.

Concernant le nombre de participants, les effectifs des groupes sont relativement faibles. Il est donc important de souligner que ces résultats ne sont pas généralisables à l'ensemble des personnes et nécessiteraient une réplification auprès d'un plus grand nombre de participants. Comme énoncé par certains auteurs (Csákvári et al., 2014), le faible nombre de participants s'explique en partie par la nature des outils utilisés et les contraintes qu'ils impliquent pour : le recrutement des participants et le traitement des données, l'organisation des structures d'accueil et l'emploi du temps de recherche. Au niveau des participants, l'absence de troubles oculaires ainsi que le critère d'âge ont réduit de manière importante les potentialités de recrutement. Les difficultés méthodologiques rencontrées (mouvements importants pendant la passation et difficultés de calibration) ont aussi dans certains cas empêché l'exploitation de certaines données. De même, le souhait d'équilibrer le nombre d'hommes et de femmes a réduit également l'échantillon, en raison d'un nombre plus faible de femmes dans la population présentant une DI. Au niveau des structures qui ont participé à la recherche, les conditions de passation (notamment au niveau d'une salle où la luminosité peut être contrôlée) ainsi que leur durée et répétition (souvent 3 séances) ont engendré une organisation importante avant et pendant la recherche. De nombreux participants exerçaient une activité professionnelle, ainsi un ou plusieurs professionnels des structures ont dû consacrer un temps important à la création d'un emploi du temps de passation adapté aux horaires et disponibilités de chaque participant. Enfin, concernant l'emploi du temps de recherche, réaliser les passations au sein de chaque structure de manière individuelle a aussi engendré un temps important dédié aux passations, aux déplacements et à l'installation du matériel. Ainsi, pour l'ensemble de ces raisons, les périodes de passations ont été étendues à plusieurs mois.

Concernant les résultats relatifs à la dilatation pupillaire, il est important de souligner qu'ils ont été étudiés à titre exploratoire. En effet, l'utilisation de la dilatation pupillaire comme indicateur de la charge cognitive pose certaines limites. En plus d'être influencée par la charge cognitive, la dilatation pupillaire est aussi sensible aux variations lumineuses et aux émotions (Ellis, 1981; Partala & Surakka, 2003). Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous avons contrôlé les conditions lumineuses, mais il est possible que les émotions ressenties par les participants aient influencé la dilatation pupillaire. Lors d'une prochaine étude, il pourrait être intéressant de

coupler cette mesure à l'activité électrodermale pour affiner les résultats observés. De même, il aurait été pertinent de réaliser une courte tâche avant l'apprentissage d'itinéraires, pour vérifier que nos conditions expérimentales permettaient bien d'utiliser la dilatation pupillaire comme indicateur de la charge cognitive. Il aurait été question par exemple de réaliser une tâche de mémorisation de chiffres impliquant différents niveaux de difficulté (Johnson et al., 2014; Kahneman & Beatty, 1966).

Enfin, il est important de souligner les difficultés soulevées par la réalisation d'une étude couplant environnement virtuel dynamique et oculométrie. Contrairement à ce que nous espérions au début de ce travail de thèse, les technologies, bien qu'elles aient évolué ces dernières années, ne permettent pas encore une automatisation du processus de détection des différentes zones d'intérêt dans une situation dynamique. Ainsi, il a fallu sélectionner les différentes zones d'intérêt manuellement, et cela image par image. Ce processus de traitement a nécessité 200 à 250 heures par étude. Cette limite a été également soulevée par Hilton et al. (2020) qui rapportaient un nombre d'heures similaire. Ce temps de traitement représente un frein considérable à la réalisation d'une recherche couplant ces deux technologies et restreint aussi les analyses à un faible nombre de participants. Il est tout de même important de noter que cette limite a été soulevée par de nombreux chercheurs, ce qui a mené à de récentes solutions pour contrer cette limite. Parmi ces solutions, nous retrouvons le perfectionnement des logiciels d'analyse pour les zones d'intérêt dynamiques, la création de scripts informatiques adaptés à chaque paradigme expérimental, mais aussi l'utilisation de zones d'intérêt générées automatiquement *a posteriori*, cette dernière solution étant surtout une réponse à une limite méthodologique propre au traitement des zones d'intérêt *a priori* (Cilia, Aubry, Bourdin, et al., 2019; Cilia, Aubry, Le Driant, et al., 2019).

7. Perspectives de recherche

Ces travaux ouvrent la voie à diverses pistes de recherche. Les études ayant été réalisées en environnements virtuels, il convient de s'interroger sur les résultats qui pourraient être obtenus en condition réelle. En effet, les mouvements oculaires peuvent être étudiés grâce à un *eye-tracker* mobile prenant la forme de lunettes. Les participants seraient ainsi amenés à apprendre des itinéraires composés des différents points de repère en condition réelle. Ce type de recherche permettrait de vérifier la transférabilité des résultats obtenus ainsi que d'étudier d'autres variables telles que la présence du mobilier urbain, de la circulation et des piétons. Cela

permettrait d'évaluer l'influence de ces variables sur le temps d'observation alloué aux différents points de repère. Ce type d'étude a été réalisé par Wenczel et al. (2017) où ils ont pu mettre en évidence une différence d'observation en lien avec l'intentionnalité d'apprentissage. Les participants observaient davantage les repères saillants structurellement lorsqu'ils devaient apprendre l'itinéraire. Earl et al. (2019) ont quant à eux utilisé ce type de dispositif auprès d'adultes avec une DI pour mesurer ce qu'ils observent dans les zones urbaines partagées (zone véhiculée et piétonne). Leurs résultats ont permis de mettre en avant une observation plus faible des éléments relatifs au trafic (voitures, piétons, signalétiques) en comparaison avec les participants au développement typique. Cette étude ne rapporte pas de limites quant à l'utilisation de ce type de matériel auprès des personnes avec une DI, ce qui laisse à penser que ce type de méthodologie ne pose pas de difficultés auprès de ce public.

Une partie des objectifs de ces travaux était d'étudier la charge cognitive appliquée à l'apprentissage d'itinéraires. Les résultats obtenus n'ont pas permis de faire ressortir un ensemble de résultats suffisants pour conclure à une différence. Il serait intéressant de simplifier le protocole de recherche en faisant uniquement varier le nombre d'intersections à apprendre. Ce type de protocole serait similaire à celui réalisé par Kahneman et Beatty (1966) où ils faisaient varier la quantité de nombres à retenir lors d'une tâche d'empan. Ce type d'étude permettrait d'agir directement sur le niveau de charge intrinsèque et d'influer sur le diamètre pupillaire de manière plus importante que lors des études réalisées.

Dans le but de mieux étudier l'influence des systèmes d'aide à la navigation, il serait intéressant de réaliser une étude sur l'influence des consignes de direction sur les comportements oculaires. En effet, les difficultés soulevées chez les personnes avec une DI relèvent en partie d'un déficit de stratégie (processus *top-down*), ainsi il convient de s'interroger de s'il est possible d'améliorer cet élément par le guidage verbal. Il s'agirait de réaliser les mêmes études en ajoutant des consignes ciblant le point de repère pertinent. Ces résultats permettraient d'étudier l'influence des consignes GPS sur les comportements attentionnels ainsi que l'apprentissage d'itinéraires.

Enfin, les capacités attentionnelles, les comportements oculaires ainsi que les processus de mémorisation sont influencés par les processus de vieillissement. Il serait ainsi pertinent d'étudier l'influence de l'avancée en âge dans un contexte d'apprentissage d'itinéraires auprès des personnes avec une DI. Ces éléments ont été étudiés auprès de la population générale, ce qui a permis de mettre en avant une observation différente des repères (Grzeschik et al., 2019;

Hilton et al., 2020), mais n'a pas été étudié auprès des personnes avec une DI, ce qui en fait une piste de recherche intéressante.

8. Conclusion générale

L'objectif de ces travaux de thèse était d'étudier la sélection des points de repère par les personnes avec une DI ainsi que l'influence de celle-ci sur l'apprentissage d'itinéraires grâce à l'oculométrie. Les résultats ont permis de montrer que les personnes avec une DI observent moins les points de repère que les personnes au développement typique, mais que cette différence s'amenuise lorsque l'environnement est épuré et que les repères sont saillants visuellement. La comparaison des performances lors de l'apprentissage d'un itinéraire composé des repères balises ou associatifs a permis de montrer que les repères balises facilitent l'apprentissage des personnes avec une DI. Cependant, lorsque les deux repères sont présents, les personnes avec une DI ne vont pas plus observer les repères balises, ce qui témoigne de leur difficulté de sélection des repères. Néanmoins, contrairement à ce qui a été trouvé dans les précédentes études, les personnes avec une DI identifient le caractère non-aidant des repères non uniques et passent un temps plus faible à les observer. Enfin, les personnes présentant une DI sont sensibles à la saillance visuelle des repères, mais celle-ci permet uniquement d'améliorer leur vitesse de réponse et non la justesse de celle-ci. L'ensemble de ces résultats montre qu'outre les difficultés de mémorisation des repères, la sélection visuelle de ceux-ci pose des difficultés pour les personnes présentant une DI. Ces études faisant partie des premières à utiliser l'oculométrie auprès des personnes avec une DI, elles nécessitent d'être répliquées auprès d'un plus grand échantillon et affinées d'un point de vue méthodologique pour étudier la charge cognitive associée à l'apprentissage. Ces éléments montrent l'importance de concevoir des systèmes d'aide à la navigation qui ont recours aux repères balises pour faciliter leur sélection et leur apprentissage. Enfin, l'amélioration des comportements d'observation montre que la sélection des points de repère est sensible à l'apprentissage, ce qui en fait une piste de remédiation importante.

Pour conclure ces travaux, il est important de rappeler que se déplacer est un besoin fondamental, un droit (Convention des Nations Unies, 2006) et que depuis la toute petite enfance c'est à travers l'exploration de son environnement, qu'un individu peut pleinement se développer et s'épanouir.

BIBLIOGRAPHIE

- Albrecht, R., & von Stuelpnagel, R. (2018). Memory for Salient Landmarks : Empirical Findings and a Cognitive Model. In S. Creem-Regehr, J. Schöning, & A. Klippel (Éds.), *Spatial Cognition XI* (Vol. 11034, p. 311-325). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96385-3_21
- Allen, G. L. (1999). Spatial abilities, cognitive maps, and wayfinding : Bases for individual differences in spatial cognition and behavior. *Wayfinding behavior*, 46-80.
- Allen, G. L. (2000). Principles and practices for communicating route knowledge. *Applied Cognitive Psychology*, 14(4), 333-359. [https://doi.org/10.1002/1099-0720\(200007/08\)14:4<333::AID-ACP655>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1099-0720(200007/08)14:4<333::AID-ACP655>3.0.CO;2-C)
- Allen, G. L., & Kirasic, K. C. (2003). Visual Attention during Route Learning : A Look at Selection and Engagement. In W. Kuhn, M. F. Worboys, & S. Timpf (Éds.), *Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science* (Vol. 2825, p. 390-398). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39923-0_26
- Alnæs, D., Sneve, M. H., Espeseth, T., Endestad, T., van de Pavert, S. H. P., & Laeng, B. (2014). Pupil size signals mental effort deployed during multiple object tracking and predicts brain activity in the dorsal attention network and the locus coeruleus. *Journal of Vision*, 14(4), 1. <https://doi.org/10.1167/14.4.1>
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (5th ed.).
- Andersen, N. E., Dahmani, L., Konishi, K., & Bohbot, V. D. (2012). Eye tracking, strategies, and sex differences in virtual navigation. *Neurobiology of Learning and Memory*, 97(1), 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2011.09.007>
- Angulo-Chavira, A. Q., García, O., & Arias-Trejo, N. (2017). Pupil response and attention skills in Down syndrome. *Research in Developmental Disabilities*, 70, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.08.011>

- Armougum, A., Gaston-Bellegarde, A., Joie-La Marle, C., & Piolino, P. (2020). Physiological investigation of cognitive load in real-life train travelers during information processing. *Applied Ergonomics*, 89, 103180. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103180>
- Armougum, A., Orriols, E., Gaston-Bellegarde, A., Marle, C. J.-L., & Piolino, P. (2019). Virtual reality : A new method to investigate cognitive load during navigation. *Journal of Environmental Psychology*, 65, 101338. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2019.101338>
- Baccino, T. (2002). Oculométrie Cognitive. In G. Tiberghien, *Dictionnaire des Sciences Cognitives* (p. 100-101). Armand Colin : Paris.
- Bahill, A. T., & Stark, L. (1975). The high-frequency burst of motoneuronal activity lasts about half the duration of saccadic eye movements. *Mathematical Biosciences*, 26(3), 319-323. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(75\)90019-X](https://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90019-X)
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 91(2), 276-292. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.91.2.276>
- Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The pupillary system. *Handbook of psychophysiology*, 2(142-162).
- Bellec, D., & Tricot, A. (2013). Étude des systèmes techniques en enseignement secondaire : Apports de la théorie de la charge cognitive. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 8, Article 8. <https://doi.org/10.4000/rdst.761>
- Bexkens, A., Ruzzano, L., Collot d' Escury-Koenigs, A. M. L., Van der Molen, M. W., & Huizenga, H. M. (2014). Inhibition deficits in individuals with intellectual disability : A meta-regression analysis: Meta-regression of inhibition in ID. *Journal of Intellectual Disability Research*, 58(1), 3-16. <https://doi.org/10.1111/jir.12068>
- Bindemann, M. (2010). Scene and screen center bias early eye movements in scene viewing. *Vision Research*, 50(23), 2577-2587. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.08.016>

- Bohbot, V. D., Iaria, G., & Petrides, M. (2004). Hippocampal function and spatial memory : Evidence from functional neuroimaging in healthy participants and performance of patients with medial temporal lobe resections. *Neuropsychology, 18*(3), 418.
- Bohbot, V. D., Lerch, J., Thorndycraft, B., Iaria, G., & Zijdenbos, A. P. (2007). Gray Matter Differences Correlate with Spontaneous Strategies in a Human Virtual Navigation Task. *Journal of Neuroscience, 27*(38), 10078-10083. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1763-07.2007>
- Bonin, P., Poulin-Charronnat, B., Lukowski Duplessy, H., Bard, P., Vinter, A., Ferrand, L., & Méot, A. (2020). IMABASE : A new set of 313 colourised line drawings standardised in French for name agreement, image agreement, conceptual familiarity, age-of-acquisition, and imageability. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 73*(11), 1862-1878. <https://doi.org/10.1177/1747021820932822>
- Boone, A. P., Gong, X., & Hegarty, M. (2018). Sex differences in navigation strategy and efficiency. *Memory & Cognition, 46*(6), 909-922. <https://doi.org/10.3758/s13421-018-0811-y>
- Boot, F. H., Pel, J. J. M., Vermaak, M. P., van der Steen, J., & Evenhuis, H. M. (2012). Delayed visual orienting responses in children with developmental and/or intellectual disabilities : Visual orienting responses in children with ID. *Journal of Intellectual Disability Research, no-no*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2012.01610.x>
- Borecki, L., Tolstych, K., & Pokorski, M. (2013). Computer Games and Fine Motor Skills. In M. Pokorski (Éd.), *Respiratory Regulation—Clinical Advances* (p. 343-348). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4546-9_43
- Bougenies, F., Leleu-Merviel, S., & Sparrow, L. (2016). Effet captivant et apaisant de la médiation par tablette au musée : Mesures physiologiques et motivationnelles. *Études de communication, 46*, 87-108. <https://doi.org/10.4000/edc.6565>

- Broadbent, H. J., Farran, E. K., & Tolmie, A. (2014). Egocentric and allocentric navigation strategies in Williams syndrome and typical development. *Developmental Science*, 17(6), 920-934. <https://doi.org/10.1111/desc.12176>
- Broadbent, H. J., Farran, E. K., & Tolmie, A. (2015). Sequential egocentric navigation and reliance on landmarks in Williams syndrome and typical development. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00216>
- Brouwer, A.-M., Hogervorst, M. A., Holewijn, M., & van Erp, J. B. F. (2014). Evidence for effects of task difficulty but not learning on neurophysiological variables associated with effort. *International Journal of Psychophysiology*, 93(2), 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.05.004>
- Brown, T. I., Gagnon, S. A., & Wagner, A. D. (2020). Stress Disrupts Human Hippocampal-Prefrontal Function during Prospective Spatial Navigation and Hinders Flexible Behavior. *Current Biology*, 30(10), 1821-1833.e8. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.03.006>
- Brunyé, T. T., Gardony, A. L., Holmes, A., & Taylor, H. A. (2018). Spatial decision dynamics during wayfinding: Intersections prompt the decision-making process. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 3(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0098-3>
- Buchner, A., & Jansen-Osmann, P. (2008). Is Route Learning More Than Serial Learning? *Spatial Cognition & Computation*, 8(4), 289-305. <https://doi.org/10.1080/13875860802047201>
- Bullens, J., Iglói, K., Berthoz, A., Postma, A., & Rondi-Reig, L. (2010). Developmental time course of the acquisition of sequential egocentric and allocentric navigation strategies. *Journal of Experimental Child Psychology*, 107(3), 337-350. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.05.010>

- Burles, F., Liu, I., Hart, C., Murias, K., Graham, S. A., & Iaria, G. (2020). The Emergence of Cognitive Maps for Spatial Navigation in 7- to 10-Year-Old Children. *Child Development, 91*(3), e733-e744. <https://doi.org/10.1111/cdev.13285>
- Burnett, G. (2000). 'Turn right at the Traffic Lights': The Requirement for Landmarks in Vehicle Navigation Systems. *The Journal of Navigation, 53*(3), 499-510. <https://doi.org/10.1017/S0373463300001028>
- Buswell, G. T. (1935). *How people look at pictures : A study of the psychology and perception in art* (p. 198). Univ. Chicago Press.
- Caduff, D., & Timpf, S. (2008). On the assessment of landmark salience for human navigation. *Cognitive Processing, 9*(4), 249-267. <https://doi.org/10.1007/s10339-007-0199-2>
- Cain, B. (2007). *A review of the mental workload literature*.
- Carlin, M., Soraci, S., Goldman, A., & Mcilvane, W. (1995). Visual search in unidimensional arrays: A comparison between subjects with and without mental retardation. *Intelligence, 21*(2), 175-196. [https://doi.org/10.1016/0160-2896\(95\)90025-X](https://doi.org/10.1016/0160-2896(95)90025-X)
- Carlin, M. T., Soraci, S. A., Dennis, N. A., Chechile, N. A., & Loiselle, R. C. (2001). Enhancing Free-Recall Rates of Individuals With Mental Retardation. *American Journal on Mental Retardation, 106*(4), 314-326.
- Carlin, M. T., Soraci, S. A., Dennis, N. A., Strawbridge, C., & Chechile, N. A. (2002). Guided Visual Search in Individuals With Mental Retardation. *AMERICAN JOURNAL ON MENTAL RETARDATION, 107*(4), 15.
- Carlin, M. T., Soraci, S. A., Strawbridge, C. P., Dennis, N., Loiselle, R., & Chechile, N. A. (2003). Detection of Changes in Naturalistic Scenes : Comparisons of Individuals With and Without Mental Retardation. *American Journal on Mental Retardation, 108*(3), 181-193. [https://doi.org/10.1352/0895-8017\(2003\)108<0181:DOCINS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1352/0895-8017(2003)108<0181:DOCINS>2.0.CO;2)

- Castelli, L., Latini Corazzini, L., & Geminiani, G. C. (2008). Spatial navigation in large-scale virtual environments : Gender differences in survey tasks. *Computers in Human Behavior*, 24(4), 1643-1667. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2007.06.005>
- Cegarra, J., & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload : Toward theoretical and methodological improvements. *Behavior Research Methods*, 40(4), 988-1000. <https://doi.org/10.3758/BRM.40.4.988>
- Chan, E., Baumann, O., Bellgrove, M. A., & Mattingley, J. B. (2012). From Objects to Landmarks : The Function of Visual Location Information in Spatial Navigation. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00304>
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive : Théorie et applications*. Armand Colin.
- Charitos, D., Karadanos, G., Sereti, E., Triantafillou, S., Koukouvinou, S., & Martakos, D. (2000). Employing virtual reality for aiding the organisation of autistic children behaviour in everyday tasks. *Proceedings of ICDVRAT*.
- Chebli, S. S., Martin, V., & Lanovaz, M. J. (2016). Prevalence of Stereotypy in Individuals with Developmental Disabilities : A Systematic Review. *Review Journal of Autism and Developmental Disorders*, 3(2), 107-118. <https://doi.org/10.1007/s40489-016-0069-x>
- Chen, S., Epps, J., Ruiz, N., & Chen, F. (2011). Eye activity as a measure of human mental effort in HCI. *Proceedings of the 16th international conference on Intelligent user interfaces*, 315-318. <https://doi.org/10.1145/1943403.1943454>
- Chrastil, E. R. (2013). Neural evidence supports a novel framework for spatial navigation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(2), 208-227. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0351-6>

- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, *19*(1), 1-23. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0182-x>
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2015). Active and passive spatial learning in human navigation : Acquisition of graph knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *41*(4), 1162-1178. <https://doi.org/10.1037/xlm0000082>
- Cilia, F., Aubry, A., Bourdin, B., & Vandromme, L. (2019). Comment déterminer les zones d'intérêt visuelles sans a priori ? Analyse des fixations d'enfants autistes en oculométrie. *Revue de neuropsychologie*, *11*(2), 144-150. <https://doi.org/10.1684/nrp.2019.0487>
- Cilia, F., Aubry, A., Le Driant, B., Bourdin, B., & Vandromme, L. (2019). Visual Exploration of Dynamic or Static Joint Attention Bids in Children With Autism Syndrome Disorder. *Frontiers in Psychology*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02187>
- Coluccia, E., & Louse, G. (2004). Gender differences in spatial orientation : A review. *Journal of Environmental Psychology*, *24*(3), 329-340. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2004.08.006>
- Courbois, Y. (2021). À la découverte de l'environnement : La navigation spatiale pendant l'enfance. *Enfance*, *N° 1*(1), 5-17.
- Courbois, Y., Blades, M., Farran, E. K., & Sockeel, P. (2012). Do individuals with intellectual disability select appropriate objects as landmarks when learning a new route? : Wayfinding, landmarks, intellectual disability. *Journal of Intellectual Disability Research*, *57*(1), 80-89. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2011.01518.x>
- Courbois, Y., Blades, M., Hudson, K. D., Sockeel, P., & Farran, E. K. (2024). Spatial exploration and navigation in Down syndrome and Williams syndrome. *Cortex*, *178*, 32-50. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2024.06.004>

- Courbois, Y., & Facon, B. (2014). 15. Les savoirs de la psychologie cognitive. In *Handicap, une encyclopédie des savoirs* (p. 257-272). Érès.
<https://doi.org/10.3917/eres.gardo.2014.01.0257>
- Courbois, Y., Farran, E. K., Lemahieu, A., Blades, M., Mengue-Topio, H., & Sockeel, P. (2013). Wayfinding behaviour in Down syndrome : A study with virtual environments. *Research in Developmental Disabilities*, 34(5), 1825-1831.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.02.023>
- Courbois, Y., Mengue-Topio, H., Blades, M., Farran, E. K., & Sockeel, P. (2019). Description of Routes in People With Intellectual Disability. *American Journal on Intellectual and Developmental Disabilities*, 124(2), 116-130. <https://doi.org/10.1352/1944-7558-124.2.116>
- Courbois, Y., Mengue-Topio, H., & Sockeel, P. (2013). Navigation spatiale et autonomie dans les déplacements : Apports des environnements virtuels. *La déficience intellectuelle face aux progrès des neurosciences: Repenser les pratiques de soin*, 214-223.
- Cousins, J. H., Siegel, A. W., & Maxwell, S. E. (1983). Way finding and cognitive mapping in large-scale environments : A test of a developmental model. *Journal of Experimental Child Psychology*, 35(1), 1-20. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(83\)90066-8](https://doi.org/10.1016/0022-0965(83)90066-8)
- Coutrot, A., Manley, E., Goodroe, S., Gahnstrom, C., Filomena, G., Yesiltepe, D., Dalton, R. C., Wiener, J. M., Hölscher, C., Hornberger, M., & Spiers, H. J. (2022). Entropy of city street networks linked to future spatial navigation ability. *Nature*, 604(7904), Article 7904. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04486-7>
- Cranford, K. N., Tiettmeyer, J. M., Chuprinko, B. C., Jordan, S., & Grove, N. P. (2014, avril 2). *Measuring Load on Working Memory: The Use of Heart Rate as a Means of Measuring Chemistry Students' Cognitive Load* (world) [Research-article]. ACS

Publications; American Chemical Society and Division of Chemical Education, Inc.

<https://doi.org/10.1021/ed400576n>

- Csákvári, J., & Gyori, M. (2015). Applicability of standard eye-tracking technique in people with intellectual disability : Methodological conclusions from a series of studies. *Studies in Health Technology and Informatics*, 217, 63-70. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-566-1-63>
- Csákvári J., Várnagy-Tóth Z., & Győri M. (2014). Applicability of eye tracking technique and visually guided saccade characteristics in adults with intellectual disability. *Magyar Pszichológiai Szemle*, 69(1), 5-26. <https://doi.org/10.1556/mpszle.69.2014.1.2>
- Curcio, C. A., Sloan, K. R., Kalina, R. E., & Hendrickson, A. E. (1990). Human photoreceptor topography. *Journal of Comparative Neurology*, 292(4), 497-523. <https://doi.org/10.1002/cne.902920402>
- Dabbs, J. M., Chang, E.-L., Strong, R. A., & Milun, R. (1998). Spatial Ability, Navigation Strategy, and Geographic Knowledge Among Men and Women. *Evolution and Human Behavior*, 19(2), 89-98. [https://doi.org/10.1016/S1090-5138\(97\)00107-4](https://doi.org/10.1016/S1090-5138(97)00107-4)
- Danielsson, H., Henry, L., Rönnerberg, J., & Nilsson, L.-G. (2010). Executive functions in individuals with intellectual disability. *Research in Developmental Disabilities*, 31(6), 1299-1304. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.07.012>
- d'Arripe, A., Lequien, J., & La Section Des Usagers, C. (2023, juin). Faire de la recherche avec les personnes concernées : Une recherche inclusive sur les transports. *Alter*. <https://hal.science/hal-04212701>
- Davies, D. K., Stock, S. E., Holloway, S., & Wehmeyer, M. L. (2010). Evaluating a GPS-Based Transportation Device to Support Independent Bus Travel by People With Intellectual Disability. *Intellectual and Developmental Disabilities*, 48(6), 454-463. <https://doi.org/10.1352/1934-9556-48.6.454>

- Davis, M., Merrill, E. C., Conners, F. A., & Roskos, B. (2014). Patterns of differences in wayfinding performance and correlations among abilities between persons with and without Down syndrome and typically developing children. *Frontiers in Psychology, 5*, 1446. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01446>
- Davis, R. (2021). The Feasibility of Using Virtual Reality and Eye Tracking in Research With Older Adults With and Without Alzheimer's Disease. *Frontiers in Aging Neuroscience, 13*, 350. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.607219>
- Davis, R., & Sikorskii, A. (2020). Eye Tracking Analysis of Visual Cues during Wayfinding in Early Stage Alzheimer's Disease. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders, 49*(1), 91-97. <https://doi.org/10.1159/000506859>
- De Condappa, O. (2016). *The use of landmark-based wayfinding strategies across the adult lifespan* [Thèse de doctorat, Bournemouth University]. <https://eprints.bournemouth.ac.uk/24751/>
- De Condappa, O., & Wiener, J. M. (2016). Human place and response learning : Navigation strategy selection, pupil size and gaze behavior. *Psychological Research, 80*(1), 82-93. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0642-9>
- de Castell, S., Larios, H., & Jenson, J. (2019). Gender, videogames and navigation in virtual space. *Acta Psychologica, 199*, 102895. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.102895>
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). The general causality orientations scale : Self-determination in personality. *Journal of Research in Personality, 19*(2), 109-134. [https://doi.org/10.1016/0092-6566\(85\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0092-6566(85)90023-6)
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The « What » and « Why » of Goal Pursuits : Human Needs and the Self-Determination of Behavior. *Psychological Inquiry, 11*(4), 227-268. https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01

- Denis, M. (2012). Chapitre 3. La cognition spatiale. In *La psychologie cognitive* (p. 101-142). Éditions de la Maison des sciences de l'homme. <https://doi.org/10.4000/books.editionsmsh.14787>
- Di Stasi, L. L., Renner, R., Staehr, P., Helmert, J. R., Velichkovsky, B. M., Cañas, J. J., Catena, A., & Pannasch, S. (2010). Saccadic Peak Velocity Sensitivity to Variations in Mental Workload. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *81*(4), 413-417. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2579.2010>
- Didehbani, N., Allen, T., Kandalaf, M., Krawczyk, D., & Chapman, S. (2016). Virtual Reality Social Cognition Training for children with high functioning autism. *Computers in Human Behavior*, *62*, 703-711. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.04.033>
- Dong, W., Liao, H., Liu, B., Zhan, Z., Liu, H., Meng, L., & Liu, Y. (2020). Comparing pedestrians' gaze behavior in desktop and in real environments. *Cartography and Geographic Information Science*, *47*(5), 432-451. <https://doi.org/10.1080/15230406.2020.1762513>
- Dong, W., Qin, T., Liao, H., Liu, Y., & Liu, J. (2020). Comparing the roles of landmark visual salience and semantic salience in visual guidance during indoor wayfinding. *Cartography and Geographic Information Science*, *47*(3), 229-243. <https://doi.org/10.1080/15230406.2019.1697965>
- Dong, W., Qin, T., Yang, T., Liao, H., Liu, B., Meng, L., & Liu, Y. (2022). Wayfinding Behavior and Spatial Knowledge Acquisition : Are They the Same in Virtual Reality and in Real-World Environments? *Annals of the American Association of Geographers*, *112*(1), 226-246. <https://doi.org/10.1080/24694452.2021.1894088>
- Dong, W., Zhan, Z., Liao, H., Meng, L., & Liu, J. (2020). Assessing Similarities and Differences between Males and Females in Visual Behaviors in Spatial Orientation

- Tasks. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 115.
<https://doi.org/10.3390/ijgi9020115>
- Downs, R. M., & Stea, D. (1973). *Cognitive maps and spatial behavior : Process and products*.
na.
- Duckham, M., Winter, S., & Robinson, M. (2010). Including landmarks in routing instructions.
Journal of Location Based Services, 4(1), 28-52.
<https://doi.org/10.1080/17489721003785602>
- Earl, R., Morris, S., Girdler, S., Falkmer, T., Cowan, G., & Falkmer, M. (2019). Visual search
strategies in a shared zone in pedestrians with and without intellectual disability.
Research in Developmental Disabilities, 94, 103493.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2019.103493>
- Elias, B. (2003). Extracting Landmarks with Data Mining Methods. In W. Kuhn, M. F.
Worboys, & S. Timpf (Éds.), *Spatial Information Theory. Foundations of Geographic
Information Science* (p. 375-389). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-39923-
0_25](https://doi.org/10.1007/978-3-540-39923-0_25)
- Ellis, C. J. (1981). The pupillary light reflex in normal subjects. *The British Journal of
Ophthalmology*, 65(11), 754-759.
- Emo, B. (2014). Seeing the Axial Line : Evidence from Wayfinding Experiments. *Behavioral
Sciences*, 4(3), 167-180. <https://doi.org/10.3390/bs4030167>
- Fang, H., Xin, S., Zhang, Y., Wang, Z., & Zhu, J. (2020). Assessing the Influence of Landmarks
and Paths on the Navigational Efficiency and the Cognitive Load of Indoor Maps. *ISPRS
International Journal of Geo-Information*, 9(2), 82. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020082>
- Fantz, R. L. (1965). Visual perception from birth as shown by pattern selectivity. *Annals of the
New York Academy of Sciences*, 118, 793-814. [https://doi.org/10.1111/j.1749-
6632.1965.tb40152.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1965.tb40152.x)

- Farran, E. K., Blades, M., Boucher, J., & Tranter, L. J. (2010). How do individuals with Williams syndrome learn a route in a real-world environment? *Developmental Science*, *13*(3), 454-468. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00894.x>
- Farran, E. K., Blades, M., Hudson, K. D., Sockeel, P., & Courbois, Y. (2022). Spatial exploration strategies in childhood; exploration behaviours are predictive of navigation success. *Cognitive Development*, *61*, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2022.101153>
- Farran, E. K., Courbois, Y., Van Herwegen, J., & Blades, M. (2012). How useful are landmarks when learning a route in a virtual environment? Evidence from typical development and Williams syndrome. *Journal of Experimental Child Psychology*, *111*(4), 571-586. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.10.009>
- Farran, E. K., Courbois, Y., Van Herwegen, J., Cruickshank, A. G., & Blades, M. (2012). Colour as an environmental cue when learning a route in a virtual environment : Typical and atypical development. *Research in Developmental Disabilities*, *33*(3), 900-908. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.11.017>
- Farran, E. K., Formby, S., Daniyal, F., Holmes, T., & Van Herwegen, J. (2016). Route-learning strategies in typical and atypical development; eye tracking reveals atypical landmark selection in Williams syndrome : Route-learning and eye tracking. *Journal of Intellectual Disability Research*, *60*(10), 933-944. <https://doi.org/10.1111/jir.12331>
- Farran, E. K., Purser, H. R. M., Courbois, Y., Ballé, M., Sockeel, P., Mellier, D., & Blades, M. (2015). Route knowledge and configural knowledge in typical and atypical development : A comparison of sparse and rich environments. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, *7*(1), 37. <https://doi.org/10.1186/s11689-015-9133-6>
- García de Marina, A. G., Carro, R. M., & Haya, P. (2012). Where should I go? Guiding users with cognitive limitations through mobile devices outdoors. *Proceedings of the 13th*

- International Conference on Interacción Persona-Ordenador*, 1-8.
<https://doi.org/10.1145/2379636.2379681>
- Geisen, M., Kim, K., Klatt, S., & Bock, O. (2021). Effects of practice on visuo-spatial attention in a wayfinding task. *Psychological Research*, 85(8), 2900-2910.
<https://doi.org/10.1007/s00426-020-01463-5>
- Gevins, A., & Smith, M. E. (2003). Neurophysiological measures of cognitive workload during human-computer interaction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4, 113-131.
<https://doi.org/10.1080/14639220210159717>
- Golledge, R. G., Richardson, D., Rayner, J. N., & Parnicky, J. J. (1983). Procedures for Defining and Analysing Cognitive maps of the Mildly and Moderately Mentally Retarded. In H. L. Pick & L. P. Acredolo, *Spatial Orientation Theory, Research, and Application* (p. 79-100). Plenum Press : New York.
- Golledge, R., Jacobson, D., Kitchin, R., & Blades, M. (2000). Cognitive Maps, Spatial Abilities, and Human Wayfinding. *Geographical review of Japan, Series B*, 73(2), 93-104.
<https://doi.org/10.4157/grj1984b.73.93>
- Gomez, J., Montoro, G., Torrado, J. C., & Plaza, A. (2015). An Adapted Wayfinding System for Pedestrians with Cognitive Disabilities. *Mobile Information Systems*, 2015, e520572. <https://doi.org/10.1155/2015/520572>
- Grison, E., & Gyselinck, V. (2019). La cognition spatiale pour repenser les aides à la navigation. *L'Année psychologique*, 119(2), 243. <https://doi.org/10.3917/anpsy1.192.0243>
- Grzeschik, R., Conroy-Dalton, R., Innes, A., Shanker, S., & Wiener, J. M. (2019). The contribution of visual attention and declining verbal memory abilities to age-related route learning deficits. *Cognition*, 187, 50-61.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.02.012>

- Gyselinck, V., Meneghetti, C., Borgetti, M., Orriols, E., Piolino, P., & De Beni, R. (2013). Considering spatial ability in virtual route learning in early aging. *Cognitive Processing*, *14*(3), 309-316. <https://doi.org/10.1007/s10339-013-0557-1>
- Hahm, J., Lee, K., Lim, S.-L., Kim, S.-Y., Kim, H.-T., & Lee, D. J.-H. (2007, mai 2). *Effects of Active Navigation on Object Recognition in Virtual Environments* (2 Madison Avenue Larchmont, NY 10538 USA) [Research-article]. [Http://Www.Liebertpub.Com/Cpb](http://www.liebertpub.com/cpb); Mary Ann Liebert, Inc. 2 Madison Avenue Larchmont, NY 10538 USA. <https://doi.org/10.1089/cpb.2006.9952>
- Haishi, K., Okuzumi, H., & Kokubun, M. (2011). Effects of age, intelligence and executive control function on saccadic reaction time in persons with intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, *32*(6), 2644-2650. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.06.009>
- Hamburger, K., & Knauff, M. (2019). Odors Can Serve as Landmarks in Human Wayfinding. *Cognitive Science*, *43*(11). <https://doi.org/10.1111/cogs.12798>
- Hamburger, K., & Röser, F. (2014). The Role of Landmark Modality and Familiarity in Human Wayfinding. *Swiss Journal of Psychology*, *73*(4), 205-213. <https://doi.org/10.1024/1421-0185/a000139>
- Hamid, S. N., Stankiewicz, B., & Hayhoe, M. (2010). Gaze patterns in navigation : Encoding information in large-scale environments. *Journal of Vision*, *10*(12), 28-28. <https://doi.org/10.1167/10.12.28>
- Harel, J., Koch, C., & Perona, P. (2007). Graph-Based Visual Saliency. In B. Schölkopf, J. Platt, & T. Hofmann (Éds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 19 (NIPS 2006)* (No. 19; Numéro 19, p. 545-552). 20th Conference on Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), Cambridge, MA. MIT Press. <https://resolver.caltech.edu/CaltechAUTHORS:20160315-111145907>

- Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 50(9), 904-908.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Éds.), *Advances in Psychology* (Vol. 52, p. 139-183). North-Holland.
[https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hartmeyer, S., Grzeschik, R., Wolbers, T., & Wiener, J. M. (2017). The Effects of Attentional Engagement on Route Learning Performance in a Virtual Environment : An Aging Study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9, 235.
<https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00235>
- Henderson, J. M., & Hayes, T. R. (2017). Meaning-based guidance of attention in scenes as revealed by meaning maps. *Nature Human Behaviour*, 1(10), 743-747.
<https://doi.org/10.1038/s41562-017-0208-0>
- Hess, E. H., & Polt, J. M. (1964). Pupil Size in Relation to Mental Activity during Simple Problem-Solving. *Science*, 143(3611), 1190-1192.
<https://doi.org/10.1126/science.143.3611.1190>
- Hilton, C., Miellet, S., Slattery, T. J., & Wiener, J. M. (2020). Are age-related deficits in route learning related to control of visual attention? *Psychological Research*, 84(6), 1473-1484. <https://doi.org/10.1007/s00426-019-01159-5>
- Hoffman, Y., Perlman, A., Orr-Urtreger, B., Tzelgov, J., Pothos, E. M., & Edwards, D. J. (2017). Unitization of route knowledge. *Psychological Research*, 81(6), 1241-1254.
<https://doi.org/10.1007/s00426-016-0811-0>
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., & Jarodzka, H. (2011). *Eye Tracking : A comprehensive guide to methods and measures*. OUP Oxford.

- Hong, M. P., Guilfoyle, J. L., Mooney, L. N., Wink, L. K., Pedapati, E. V., Shaffer, R. C., Sweeney, J. A., & Erickson, C. A. (2017). Eye gaze and pupillary response in Angelman syndrome. *Research in Developmental Disabilities*, 68, 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.06.011>
- Huang, Z., Stanford, M. S., & Barratt, E. S. (1994). Blink rate related to impulsiveness and task demands during performance of event-related potential tasks. *Personality and Individual Differences*, 16(4), 645-648. [https://doi.org/10.1016/0191-8869\(94\)90192-9](https://doi.org/10.1016/0191-8869(94)90192-9)
- Hupé, J.-M., Lamirel, C., & Lorenceau, J. (2009). Pupil dynamics during bistable motion perception. *Journal of vision*, 9(7), 10-10.
- Iaria, G., Palermo, L., Committeri, G., & Barton, J. J. S. (2009). Age differences in the formation and use of cognitive maps. *Behavioural Brain Research*, 196(2), 187-191. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.08.040>
- Iglói, K., Zaoui, M., Berthoz, A., & Rondi-Reig, L. (2009). Sequential egocentric strategy is acquired as early as allocentric strategy : Parallel acquisition of these two navigation strategies. *Hippocampus*, 19(12), 1199-1211. <https://doi.org/10.1002/hipo.20595>
- INSERM. (2016). *Déficiences intellectuelles*. Collection Expertise collective. Montrouge : EDP Sciences,.
- Ishikawa, T., Fujiwara, H., Imai, O., & Okabe, A. (2008). Wayfinding with a GPS-based mobile navigation system : A comparison with maps and direct experience. *Journal of Environmental Psychology*, 28(1), 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2007.09.002>
- Ishikawa, T., & Montello, D. R. (2006). Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment : Individual differences in the development of metric knowledge and the integration of separately learned places. *Cognitive Psychology*, 52(2), 93-129. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2005.08.003>

- Itti, L., & Koch, C. (2000). A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision Research*, 40(10), 1489-1506. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00163-7](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00163-7)
- Itti, L., Koch, C., & Niebur, E. (1998). A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(11), 1254-1259. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. <https://doi.org/10.1109/34.730558>
- Jansen-Osmann, P. (2002). Using desktop virtual environments to investigate the role of landmarks. *Computers in Human behavior*, 18(4), 427-436.
- Jansen-Osmann, P., & Berendt, B. (2002). Investigating Distance Knowledge Using Virtual Environments. *Environment and Behavior*, 34(2), 178-193. <https://doi.org/10.1177/0013916502034002002>
- Jansen-Osmann, P., & Fuchs, P. (2006). Wayfinding Behavior and Spatial Knowledge of Adults and Children in a Virtual Environment : The Role of Landmarks. *Experimental Psychology*, 53(3), 171-181. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.53.3.171>
- Janzen, G. (2006). Memory for object location and route direction in virtual large-scale space. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(3), 493-508. <https://doi.org/10.1080/02724980443000746>
- Johnson, E., Miller Singley, A., Peckham, A., Johnson, S., & Bunge, S. (2014). Task-evoked pupillometry provides a window into the development of short-term memory capacity. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2014.00218>
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8(4), 441-480. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(76\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(76)90015-3)

- Kahneman, D., & Beatty, J. (1966). Pupil Diameter and Load on Memory. *Science*, *154*(3756), 1583-1585. <https://doi.org/10.1126/science.154.3756.1583>
- Kail, R. (1992). General slowing of information-processing by persons with mental retardation. *American Journal of Mental Retardation: AJMR*, *97*(3), 333-341.
- Kato, Y., & Takeuchi, Y. (2003). Individual differences in wayfinding strategies. *Journal of Environmental Psychology*, *23*(2), 171-188. [https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(03\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(03)00011-2)
- Keller, M., & Sutton, J. E. (2021). Individual differences in the allocation of visual attention during navigation. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*. <https://doi.org/10.1037/cep0000247>
- Kelley, K. R., Test, D. W., & Cooke, N. L. (2013). Effects of Picture Prompts Delivered by a Video iPod on Pedestrian Navigation. *Exceptional Children*, *79*(4), 459-474.
- Khadra, C., Ballard, A., Déry, J., Paquin, D., Fortin, J.-S., Perreault, I., Labbe, D. R., Hoffman, H. G., Bouchard, S., & LeMay, S. (2018). Projector-based virtual reality dome environment for procedural pain and anxiety in young children with burn injuries : A pilot study. *Journal of Pain Research*, *11*, 343-353. <https://doi.org/10.2147/JPR.S151084>
- Kiefer, P., Giannopoulos, I., Duchowski, A., & Raubal, M. (2016). Measuring Cognitive Load for Map Tasks Through Pupil Diameter. In J. A. Miller, D. O'Sullivan, & N. Wiegand (Éds.), *Geographic Information Science* (Vol. 9927, p. 323-337). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45738-3_21
- Kiefer, P., Giannopoulos, I., Raubal, M., & Duchowski, A. (2017). Eye tracking for spatial research : Cognition, computation, challenges. *Spatial Cognition & Computation*, *17*(1-2), 1-19. <https://doi.org/10.1080/13875868.2016.1254634>

- Kim, J., Hwang, E., Shin, H., Gil, Y.-H., & Lee, J. (2021). Top-down, bottom-up, and history-driven processing of multisensory attentional cues in intellectual disability: An experimental study in virtual reality. *PLOS ONE*, *16*(12), e0261298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261298>
- Kim, K., & Bock, O. (2021). Acquisition of landmark, route, and survey knowledge in a wayfinding task: In stages or in parallel? *Psychological Research*, *85*(5), 2098-2106. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01384-3>
- Klingner, J., Kumar, R., & Hanrahan, P. (2008). Measuring the task-evoked pupillary response with a remote eye tracker. *Proceedings of the 2008 symposium on Eye tracking research & applications*, 69-72.
- Klippel, A., & Winter, S. (2005). Structural Saliency of Landmarks for Route Directions. In A. G. Cohn & D. M. Mark (Éds.), *Spatial Information Theory* (Vol. 3693, p. 347-362). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11556114_22
- Krassanakis, Filippakopoulou, & Nakos. (2014). *EyeMMV toolbox: An eye movement post-analysis tool based on a two-step spatial dispersion threshold for fixation identification*. <https://doi.org/10.16910/JEMR.7.1.1>
- Kwok, S. K., Ho, P. C. P., Chan, A. K. H., Gandhi, S. R., & Urn, D. S. C. (1996). Ocular defects in children and adolescents with severe mental deficiency. *Journal of Intellectual Disability Research*, *40*(4), 330-335. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.1996.tb00638.x>
- Laeng, B., Ørbo, M., Holmlund, T., & Miozzo, M. (2011). Pupillary Stroop effects. *Cognitive Processing*, *12*(1), 13-21. <https://doi.org/10.1007/s10339-010-0370-z>
- Lakehal, A., Lepreux, S., Letalle, L., & Kolski, C. (2021). From Wayfinding Model to Future Context-based Adaptation of HCI in Urban Mobility for Pedestrians with Active

- Navigation Needs. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(4), 378-389. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1860546>
- Lanfranchi, S., Cornoldi, C., & Vianello, R. (2004). Verbal and Visuospatial Working Memory Deficits in Children With Down Syndrome. *AMERICAN JOURNAL ON MENTAL RETARDATION*, 109(6), 11.
- Lehning, M., Leplow, B., Friege, L., Herzog, A., Ferstl, R., & Mehdorn, M. (1998). Development of spatial memory and spatial orientation in preschoolers and primary school children. *British Journal of Psychology*, 89(3), 463-480. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1998.tb02697.x>
- Lemercier, A. (2014). *Développement de la pupillométrie pour la mesure objective des émotions dans le contexte de la consommation alimentaire.pdf*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01181133/document>
- Lense, M. D., Key, A. P., & Dykens, E. M. (2011). Attentional disengagement in adults with Williams syndrome. *Brain and Cognition*, 77(2), 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.08.008>
- Letalle, L., Mengue-Topio, H., & Courbois, Y. (2021). Apprendre à se déplacer de façon autonome en cas de déficience intellectuelle. *Enfance*, N° 1(1), 85-98.
- Lifshitz, H., Shtein, S., Weiss, I., & Svisrsky, N. (2011). Explicit memory among individuals with mild and moderate intellectual disability: Educational implications. *European Journal of Special Needs Education*, 26(1), 113-124. <https://doi.org/10.1080/08856257.2011.543536>
- Lifshitz-Vahav, H., & Vakil, E. (2014). Taxonomy of moderators that govern explicit memory in individuals with intellectual disability: Integrative research review. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 3(2), 101-119. <https://doi.org/10.1016/j.jarmac.2014.03.001>

- Ligonnière, V. (2021). *Points de repère et saillances dans les représentations spatiales : Faciliter la navigation piétonne des personnes âgées*. Université de Paris.
- Lingwood, J., Blades, M., Farran, E. K., Courbois, Y., & Matthews, D. (2015). The development of wayfinding abilities in children : Learning routes with and without landmarks. *Journal of Environmental Psychology*, *41*, 74-80.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.11.008>
- Lingwood, J., Blades, M., Farran, E. K., Courbois, Y., & Matthews, D. (2018). Using virtual environments to investigate wayfinding in 8- to 12-year-olds and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, *166*, 178-189.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.08.012>
- Lingwood, J., Farran, E. K., Courbois, Y., & Blades, M. (2020). Investigating route learning, metacognition, and beacon-based strategies using virtual environments. *European Review of Applied Psychology*, *70*(4), 100570.
<https://doi.org/10.1016/j.erap.2020.100570>
- Linh Quang, S. B., Berney, S., Maurer, R., & Betrancourt, M. (2023). Utilisation d'un environnement virtuel en classe, quels effets sur les représentations spatiales des élèves de la 4P à la 6P (7-11 ans)? *Colloque International PIAGET-RIPSYDEVE 2023 : Psychologie du Développement et de l'Éducation : Enjeux actuels et défis pour le XXIème siècle*, Université de Genève, Suisse, Communication orale, page. 153.
- Lisi, M., Bonato, M., & Zorzi, M. (2015). Pupil dilation reveals top-down attentional load during spatial monitoring. *Biological Psychology*, *112*, 39-45.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.10.002>
- Livingstone-Lee, S. A., Murchison, S., Zeman, P. M., Gandhi, M., van Gerven, D., Stewart, L., Livingston, N. J., & Skelton, R. W. (2011). Simple gaze analysis and special design of

- a virtual Morris water maze provides a new method for differentiating egocentric and allocentric navigational strategy choice. *Behavioural brain research*, 225(1), 117-125.
- Lobben, A. K. (2004). Tasks, Strategies, and Cognitive Processes Associated With Navigational Map Reading : A Review Perspective*. *The Professional Geographer*, 56(2), 270-281. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.2004.05602010.x>
- Lourdeaux, D. (2001). *Réalité virtuelle et formation : Conception d'environnements virtuels pédagogiques* [These de doctorat, Paris, ENMP]. <https://www.theses.fr/2001ENMP1023>
- Lussier-Desrochers, D., Normand, C., Fecteau, S., Roux, J., Godin-Tremblay, V., Dupont, M.-È., Caouette, M., Romero-Torres, A., Viau-Quesnel, C., Lachapelle, Y., & Pépin-Beauchesne, L. (2016). Modélisation soutenant l'inclusion numérique des personnes présentant une DI ou un TSA. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, 27, 5-24. <https://doi.org/10.7202/1039012ar>
- Lynch, K. A. (1960). *The image of the city*. Massachussets Institute of Technology Press.
- Magliacano, A., Fiorenza, S., Estraneo, A., & Trojano, L. (2020). Eye blink rate increases as a function of cognitive load during an auditory oddball paradigm. *Neuroscience Letters*, 736, 135293. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2020.135293>
- Maier, M. E., Ernst, B., & Steinhauser, M. (2019). Error-related pupil dilation is sensitive to the evaluation of different error types. *Biological Psychology*, 141, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.12.013>
- Maquestiaux, F. (2017). *Psychologie de l'attention*. De Boeck Superieur.
- Mathews, M., Mitrovic, A., Ohlsson, S., Holland, J., & McKinley, A. (2016). A Virtual Reality Environment for Rehabilitation of Prospective Memory in Stroke Patients. *Procedia Computer Science*, 96, 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.08.081>

- May, A. J., Ross, T., Bayer, S. H., & Tarkiainen, M. J. (2003). Pedestrian navigation aids : Information requirements and design implications. *Personal and Ubiquitous Computing*, 7(6), 331-338. <https://doi.org/10.1007/s00779-003-0248-5>
- McMahon, D. D., Smith, C. C., Cihak, D. F., Wright, R., & Gibbons, M. M. (2015). Effects of Digital Navigation Aids on Adults With Intellectual Disabilities : Comparison of Paper Map, Google Maps, and Augmented Reality. *Journal of Special Education Technology*, 30(3), 157-165. <https://doi.org/10.1177/0162643415618927>
- Meilinger, T., Frankenstein, J., & Bühlhoff, H. H. (2014). When in doubt follow your nose—A wayfinding strategy. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2014.01363>
- Meilinger, T., Strickrodt, M., & Bühlhoff, H. H. (2018). Spatial Survey Estimation Is Incremental and Relies on Directed Memory Structures. In S. Creem-Regehr, J. Schöning, & A. Klippel (Éds.), *Spatial Cognition XI* (p. 27-42). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96385-3_3
- Mengue-Topio, H., Bachimont, F., & Courbois, Y. (2017). Influence des stimuli sociaux sur l'apprentissage de l'utilisation des transports en commun chez les personnes avec une déficience intellectuelle. *Revue Suisse de pédagogie spécialisée*, 3, 7.
- Mengue-Topio, H., & Courbois, Y. (2011). L'autonomie des déplacements chez les personnes ayant une déficience intellectuelle : Une enquête réalisée auprès de travailleurs en établissement et service d'aide par le travail. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, 22, 5-13.
- Mengue-Topio, H., Courbois, Y., Farran, E. K., & Sockeel, P. (2011). Route learning and shortcut performance in adults with intellectual disability: A study with virtual environments. *Research in Developmental Disabilities*, 32(1), 345-352. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.10.014>

- Mengue-Topio, H., Courbois, Y., & Sockeel, P. (2015). Acquisition des connaissances spatiales par la personne présentant une déficience intellectuelle dans les environnements virtuels. *Revue francophone de la déficience intellectuelle*, 26, 88-101. <https://doi.org/10.7202/1036413ar>
- Mengue-Topio, H., Letalle, L., & Courbois, Y. (2020). Autonomie des déplacements et déficience intellectuelle : Quels défis pour les professionnels ? *Alter*, 14(2), 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.alter.2020.03.003>
- Mengue-Topio, H., Letalle, L., Courbois, Y., & Pudlo, P. (2023). Independent Travel and People with Intellectual Disabilities: Viewpoints of Support Staff About Travel Patterns, Skills and Use of Technological Solutions. In *International Conference on Human-Computer Interaction: HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems : 5th International Conference*, (p. 275-288). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35908-8_19
- Merrill, E. C. (2006). Interference and Inhibition in Tasks of Selective Attention by Persons With and Without Mental Retardation. *American Journal on Mental Retardation*, 111(3), 216. [https://doi.org/10.1352/0895-8017\(2006\)111\[216:IAIITO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1352/0895-8017(2006)111[216:IAIITO]2.0.CO;2)
- Merrill, E. C., & O'dekirk, J. M. (1994). Visual selective attention and mental retardation. *Cognitive Neuropsychology*, 11(2), 117-132. <https://doi.org/10.1080/02643299408251970>
- Michon, P.-E., & Denis, M. (2001). When and Why Are Visual Landmarks Used in Giving Directions? In D. R. Montello (Éd.), *Spatial Information Theory* (p. 292-305). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45424-1_20
- Migliore, A., Grossi, T., Mank, D., & Rogan, P. (2008). Why do adults with intellectual disabilities work in sheltered workshops? *Journal of Vocational Rehabilitation*, 28(1), 29-40.

- Moar, I., & Bower, G. H. (1983). Inconsistency in spatial knowledge. *Memory & Cognition*, *11*(2), 107-113. <https://doi.org/10.3758/BF03213464>
- Moffat, S. D., Elkins, W., & Resnick, S. M. (2006). Age differences in the neural systems supporting human allocentric spatial navigation. *Neurobiology of Aging*, *27*(7), 965-972. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2005.05.011>
- Moffat, S. D., Hampson, E., & Hatzipantelis, M. (1998). Navigation in a “Virtual” Maze : Sex Differences and Correlation With Psychometric Measures of Spatial Ability in Humans. *Evolution and Human Behavior*, *19*(2), 73-87. [https://doi.org/10.1016/S1090-5138\(97\)00104-9](https://doi.org/10.1016/S1090-5138(97)00104-9)
- Moffat, S. D., Zonderman, A. B., & Resnick, S. M. (2001). Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of Aging*, *22*(5), 787-796. [https://doi.org/10.1016/S0197-4580\(01\)00251-2](https://doi.org/10.1016/S0197-4580(01)00251-2)
- Montello, D. R. (2005). Navigation. In *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking* (p. 257-294). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511610448.008>
- Morganti, F., Carassa, A., & Geminiani, G. (2007). Planning optimal paths : A simple assessment of survey spatial knowledge in virtual environments. *Computers in Human Behavior*, *23*(4), 1982-1996. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2006.02.006>
- Morris, R. (1984). Developments of a water-maze procedure for studying spatial learning in the rat. *Journal of Neuroscience Methods*, *11*(1), 47-60. [https://doi.org/10.1016/0165-0270\(84\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0165-0270(84)90007-4)
- Mueller, S. C., Jackson, C. P. T., & Skelton, R. W. (2008). Sex differences in a virtual water maze : An eye tracking and pupillometry study. *Behavioural Brain Research*, *193*(2), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.05.017>

- Münzer, S., Zimmer, H. D., Schwalm, M., Baus, J., & Aslan, I. (2006). Computer-assisted navigation and the acquisition of route and survey knowledge. *Journal of Environmental Psychology*, 26(4), 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2006.08.001>
- Murias, K., Kwok, K., Castillejo, A. G., Liu, I., & Iaria, G. (2016). The effects of video game use on performance in a virtual navigation task. *Computers in Human Behavior*, 58, 398-406. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.01.020>
- Nikishina, V. B., Prirodova, O. F., Petrash, E. A., & Sevrukova, I. A. (2021). Oculomotor response to images in primary school children with mild intellectual disability. *Bulletin of Russian State Medical University*, 1, 51-58.
- N'Kaoua, B., Landuran, A., & Sauzéon, H. (2019). Wayfinding in a virtual environment and Down syndrome : The impact of navigational aids. *Neuropsychology*, 33(8), 1045-1056. <https://doi.org/10.1037/neu0000578>
- Ohm, C., Müller, M., & Ludwig, B. (2017). Evaluating indoor pedestrian navigation interfaces using mobile eye tracking. *Spatial Cognition & Computation*, 17(1-2), 89-120.
- O'keefe, J., & Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford university press.
- Orquin, J. L., & Mueller Loose, S. (2013). Attention and choice : A review on eye movements in decision making. *Acta Psychologica*, 144(1), 190-206. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.06.003>
- Owens, P. L., Kerker, B. D., Zigler, E., & Horwitz, S. M. (2006). Vision and oral health needs of individuals with intellectual disability. *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews*, 12(1), 28-40. <https://doi.org/10.1002/mrdd.20096>
- Paint 3D*. (2022). [Logiciel]. Microsoft Corporation.
- Pang, L., Fan, Y., Deng, Y., Wang, X., & Wang, T. (2020). Mental Workload Classification By Eye Movements In Visual Search Tasks. *2020 13th International Congress on Image*

- and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, 29-33.
<https://doi.org/10.1109/CISP-BMEI51763.2020.9263668>
- Paour, J.-L. (2004). 172. Une conception cognitive et développementale de la déficience intellectuelle. In *Nouveau traité de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent: Vol. 2e éd.* (p. 2985-3009). Presses Universitaires de France.
<https://doi.org/10.3917/puf.diatk.2004.01.2985>
- Partala, T., & Surakka, V. (2003). Pupil size variation as an indication of affective processing. *International Journal of Human-Computer Studies*, 59(1), 185-198.
[https://doi.org/10.1016/S1071-5819\(03\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S1071-5819(03)00017-X)
- Parush, A., Ahuvia, S., & Erev, I. (2007). Degradation in Spatial Knowledge Acquisition When Using Automatic Navigation Systems. In S. Winter, M. Duckham, L. Kulik, & B. Kuipers (Éds.), *Spatial Information Theory* (p. 238-254). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-74788-8_15
- Peavler, W. S. (1974). Pupil Size, Information Overload, and Performance Differences. *Psychophysiology*, 11(5), 559-566. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1974.tb01114.x>
- Phillips, S. A. (2015). *The Effect of Familiarity and Complexity of Environments, and Mode of Wayfinding on Gaze and Memory* [Waterloo].
<https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/9118>
- Plesa Skwerer, D., Ammerman, E., André, M.-C., Ciciolla, L., Fine, A. B., & Tager-Flusberg, H. (2011). A multimeasure approach to investigating affective appraisal of social information in Williams syndrome. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 3(4), 325-334. <https://doi.org/10.1007/s11689-011-9100-9>
- Ponson, L., Gomot, M., Blanc, R., Barthelemy, C., Roux, S., Munnich, A., Romana, S., Aguilon-Hernandez, N., Malan, V., & Bonnet-Brilhault, F. (2018). 22q13 deletion

- syndrome : Communication disorder or autism? Evidence from a specific clinical and neurophysiological phenotype. *Translational Psychiatry*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41398-018-0212-9>
- Porter, G., Troscianko, T., & Gilchrist, I. D. (2007). Effort during visual search and counting : Insights from pupillometry. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(2), 211-229. <https://doi.org/10.1080/17470210600673818>
- Posner, M. I. (1980). Orienting of Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3-25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231>
- Pouget, P. (2019). Introduction to the Study of Eye Movements. In C. Klein & U. Ettinger (Éds.), *Eye Movement Research : An Introduction to its Scientific Foundations and Applications* (p. 3-10). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20085-5_1
- Powers, K. L., Brooks, P. J., Aldrich, N. J., Palladino, M. A., & Alfieri, L. (2013). Effects of video-game play on information processing : A meta-analytic investigation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(6), 1055-1079. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0418-z>
- Purser, H. R. M., Farran, E. K., Courbois, Y., Lemahieu, A., Sockeel, P., Mellier, D., & Blades, M. (2015). The development of route learning in Down syndrome, Williams syndrome and typical development : Investigations with virtual environments. *Developmental Science*, 18(4), 599-613. <https://doi.org/10.1111/desc.12236>
- Quesnot, T., & Roche, S. (2014). Measure of Landmark Semantic Salience through Geosocial Data Streams. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), 1-31. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010001>
- Quesnot, T., & Roche, S. (2015). Quantifying the Significance of Semantic Landmarks in Familiar and Unfamiliar Environments. In S. I. Fabrikant, M. Raubal, M. Bertolotto, C.

- Davies, S. Freundsuh, & S. Bell (Éds.), *Spatial Information Theory* (Vol. 9368, p. 468-489). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23374-1_22
- Raubal, M., & Winter, S. (2002). Enriching Wayfinding Instructions with Local Landmarks. In M. J. Egenhofer & D. M. Mark (Éds.), *Geographic Information Science* (Vol. 2478, p. 243-259). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-45799-2_17
- Raven, J. C. (1998). *Raven's progressive matrices and vocabulary scales* (Vol. 759). Oxford psychologists Press Oxford, England.
- Raven, J. C. (2019). *RAVEN'S 2—Matrices Progressives* [Logiciel]. Adaptation française ECPA par PEARSON.
- Rayner, K. (2009). Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(8), 1457-1506. <https://doi.org/10.1080/17470210902816461>
- Reid, G. B., & Nygren, T. E. (1988). The Subjective Workload Assessment Technique : A Scaling Procedure for Measuring Mental Workload. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Éds.), *Advances in Psychology* (Vol. 52, p. 185-218). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62387-0](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62387-0)
- Reilly, J., Zuckerman, B., & Kelly, A. (2021). *A Primer on Design and Data Analysis for Cognitive Pupillometry*.
- Richard, C. (2018). *Déficiences intellectuelles. De la compréhension à la prise en charge*. De Boeck Supérieur. <https://shs.cairn.info/deficiences-intellectuelles--9782353274475>
- Richter, K.-F. (2013). Prospects and Challenges of Landmarks in Navigation Services. In M. Raubal, D. M. Mark, & A. U. Frank (Éds.), *Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space : New Perspectives on Geographic Information Research* (p. 83-97). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34359-9_5

- Ring, M., Gaigg, S. B., de Condappa, O., Wiener, J. M., & Bowler, D. M. (2018). Spatial navigation from same and different directions : The role of executive functions, memory and attention in adults with autism spectrum disorder. *Autism Research, 11*(5), 798-810.
- Robertson, J., Hatton, C., Emerson, E., & Baines, S. (2015). Prevalence of epilepsy among people with intellectual disabilities : A systematic review. *Seizure, 29*, 46-62.
<https://doi.org/10.1016/j.seizure.2015.03.016>
- Rondi-Reig, L., Petit, G. H., Tobin, C., Tonegawa, S., Mariani, J., & Berthoz, A. (2006). Impaired Sequential Egocentric and Allocentric Memories in Forebrain-Specific–NMDA Receptor Knock-Out Mice during a New Task Dissociating Strategies of Navigation. *Journal of Neuroscience, 26*(15), 4071-4081.
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3408-05.2006>
- Rose, F. D., Brooks, B. M., & Attree, E. A. (2002). An exploratory investigation into the usability and usefulness of training people with learning disabilities in a virtual environment. *Disability and Rehabilitation, 24*(11-12), 627-633.
<https://doi.org/10.1080/09638280110111405>
- Röser, F., Hamburger, K., Krumnack, A., & Knauff, M. (2012). The structural salience of landmarks : Results from an on-line study and a virtual environment experiment. *Journal of Spatial Science, 57*(1), 37-50.
<https://doi.org/10.1080/14498596.2012.686362>
- Röser, F., Krumnack, A., & Hamburger, K. (2013). The influence of perceptual and structural salience. *Proceedings of the annual meeting of the cognitive science society, 35*(35).
- Ross, T., May, A., & Thompson, S. (2004). The Use of Landmarks in Pedestrian Navigation Instructions and the Effects of Context. In S. Brewster & M. Dunlop (Éds.), *Mobile Human-Computer Interaction—MobileHCI 2004* (p. 300-304). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-28637-0_26

- Rubio, S., Diaz, E., Martin, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of Subjective Mental Workload : A Comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile Methods. *Applied Psychology*, 53(1), 61-86. <https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x>
- Ruddle, R. A., Payne, S. J., & Jones, D. M. (1997). Navigating buildings in" desk-top" virtual environments : Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3(2), 143.
- Ruddle, R. A., Volkova, E., Mohler, B., & Bühlhoff, H. H. (2011). The effect of landmark and body-based sensory information on route knowledge. *Memory & Cognition*, 39(4), 686-699. <https://doi.org/10.3758/s13421-010-0054-z>
- Ruginski, I. T., Creem-Regehr, S. H., Stefanucci, J. K., & Cashdan, E. (2019). GPS use negatively affects environmental learning through spatial transformation abilities. *Journal of Environmental Psychology*, 64, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2019.05.001>
- Ryu, K., & Myung, R. (2005). Evaluation of mental workload with a combined measure based on physiological indices during a dual task of tracking and mental arithmetic. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(11), 991-1009. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.04.005>
- Sadalla, E. K., & Magel, S. G. (1980). The Perception of Traversed Distance. *Environment and Behavior*, 12(1), 65-79. <https://doi.org/10.1177/0013916580121005>
- Sadeghian, P., & Kantardzic, M. (2008). The New Generation of Automatic Landmark Detection Systems : Challenges and Guidelines. *Spatial Cognition & Computation*, 8(3), 252-287. <https://doi.org/10.1080/13875860802039257>
- Safari, M. C., Wass, S., Haugland, S., & Thygesen, E. (2023). *Intellectual Disability, Digital Technologies, And Independent Transportation—A Scoping Review*.

- Saito, T., Sudo, R., & Takano, Y. (2020). The gaze bias effect in toddlers : Preliminary evidence for the developmental study of visual decision-making. *Developmental Science*, 23(6), e12969. <https://doi.org/10.1111/desc.12969>
- Sandfeld Nielsen, L., Skov, L., & Jensen, H. (2007). Visual dysfunctions and ocular disorders in children with developmental delay. II. Aspects of refractive errors, strabismus and contrast sensitivity. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 85(4), 419-426. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0420.2007.00881.x>
- Shimojo, S., Simion, C., Shimojo, E., & Scheier, C. (2003). Gaze bias both reflects and influences preference. *Nature Neuroscience*, 6(12), 1317-1322. <https://doi.org/10.1038/nn1150>
- Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The Development of Spatial Representations of Large-Scale Environments. In H. W. Reese (Éd.), *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 10, p. 9-55). JAI. [https://doi.org/10.1016/S0065-2407\(08\)60007-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2407(08)60007-5)
- Slevin, E., Lavery, I., Sines, D., & Knox, J. (1998). Independent travel and people with learning disabilities : The views of a sample of service providers on whether this need is being met. *Journal of Learning Disabilities for Nursing, Health and Social Care*, 2(4), 195-202.
- Smith, C. C., Cihak, D. F., Kim, B., McMahon, D. D., & Wright, R. (2017). Examining Augmented Reality to Improve Navigation Skills in Postsecondary Students With Intellectual Disability. *Journal of Special Education Technology*, 32(1), 3-11. <https://doi.org/10.1177/0162643416681159>
- Sorrows, M. E., & Hirtle, S. C. (1999). The Nature of Landmarks for Real and Electronic Spaces. In C. Freksa & D. M. Mark (Éds.), *Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science* (p. 37-50). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-48384-5_3

- Spaniol, M., & Danielsson, H. (2022). A meta-analysis of the executive function components inhibition, shifting, and attention in intellectual disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research*, 66(1-2), 9-31. <https://doi.org/10.1111/jir.12878>
- Steck, S. D., & Mallot, H. A. (2000). The Role of Global and Local Landmarks in Virtual Environment Navigation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(1), 69-83. <https://doi.org/10.1162/105474600566628>
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
- Sun, R., & Shea, J. B. (2016). Probing attention prioritization during dual-task step initiation : A novel method. *Experimental Brain Research*, 234(4), 1047-1056. <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4534-z>
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving : Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4(4), 295-312. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5)
- Sweller, J. (2010). Element Interactivity and Intrinsic, Extraneous, and Germane Cognitive Load. *Educational Psychology Review*, 22(2), 123-138. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9128-5>
- Tatler, B. W. (2007). The central fixation bias in scene viewing : Selecting an optimal viewing position independently of motor biases and image feature distributions. *Journal of Vision*, 7(14), 4. <https://doi.org/10.1167/7.14.4>
- Tatler, B. W., & Vincent, B. T. (2008). Systematic tendencies in scene viewing. *Journal of Eye Movement Research*, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.16910/jemr.2.2.5>
- The jamovi project* (Version 2.2). (2021). [Logiciel]. <https://www.jamovi.org>
- The Jamovi project* (Version 2.4). (2023). [Logiciel]. <https://www.jamovi.org>

- Theeuwes, J. (2010). Top-down and bottom-up control of visual selection. *Acta Psychologica*, 135(2), 77-99. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.02.006>
- Thorndyke, P. W., & Hayes-Roth, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive psychology*, 14(4), 560-589.
- Tlauka, M., Brolese, A., Pomeroy, D., & Hobbs, W. (2005). Gender differences in spatial knowledge acquired through simulated exploration of a virtual shopping centre. *Journal of Environmental Psychology*, 25(1), 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2004.12.002>
- Töllner, T., Zehetleitner, M., Gramann, K., & Müller, H. J. (2011). Stimulus Saliency Modulates Pre-Attentive Processing Speed in Human Visual Cortex. *PLOS ONE*, 6(1), e16276. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016276>
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55(4), 189-208. <https://doi.org/10.1037/h0061626>
- Tomko, M., & Winter, S. (2006). Recursive construction of granular route directions. *Journal of Spatial Science*, 51(1), 101-115. <https://doi.org/10.1080/14498596.2006.9635067>
- Tomko, M., & Winter, S. (2009). Pragmatic Construction of Destination Descriptions for Urban Environments. *Spatial Cognition & Computation*, 9(1), 1-29. <https://doi.org/10.1080/13875860802427775>
- Treisman, A., & Gormican, S. (1988). Feature analysis in early vision : Evidence from search asymmetries. *Psychological review*, 95(1), 15.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1), 97-136. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(80\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(80)90005-5)
- Tsang, P. S., & Velazquez, V. L. (1996). Diagnosticity and multidimensional subjective workload ratings. *Ergonomics*, 39(3), 358-381. <https://doi.org/10.1080/00140139608964470>

- Unema, P. J. A., Pannasch, S., Joos, M., & Velichkovsky, B. M. (2005). Time course of information processing during scene perception : The relationship between saccade amplitude and fixation duration. *Visual Cognition*, 12(3), 473-494. <https://doi.org/10.1080/13506280444000409>
- van Splunder, J., Stilma, J. S., Bernsen, R. M. D., & Evenhuis, H. M. (2004). Prevalence of ocular diagnoses found on screening 1539 adults with intellectual disabilities. *Ophthalmology*, 111(8), 1457-1463. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2003.12.051>
- van Splunder, J., Stilma, J. S., Bernsen, R. M. D., & Evenhuis, H. M. (2006). Prevalence of visual impairment in adults with intellectual disabilities in the Netherlands : Cross-sectional study. *Eye*, 20(9), 1004-1010. <https://doi.org/10.1038/sj.eye.6702059>
- Veltman, J. A., & Gaillard, A. W. K. (1998). Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty. *Ergonomics*, 41(5), 656-669. <https://doi.org/10.1080/001401398186829>
- Ventura, M., Shute, V., Wright, T., & Zhao, W. (2013). An investigation of the validity of the virtual spatial navigation assessment. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2013.00852>
- Viaene, P., Ooms, K., Vansteenkiste, P., Lenoir, M., & Maeyer, P. D. (2014). *The Use of Eye Tracking in Search of Indoor Landmarks*. 5.
- Waller, D. (2000). Individual differences in spatial learning from computer-simulated environments. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(4), 307-321. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.6.4.307>
- Waller, D., Hunt, E., & Knapp, D. (1998). The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence*, 7(2), 129-143.
- Waller, D., & Lipka, Y. (2007). Landmarks as beacons and associative cues : Their role in route learning. *Memory & Cognition*, 35(5), 910-924. <https://doi.org/10.3758/BF03193465>

- Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., & N’Kaoua, B. (2009). Transfer of spatial knowledge from a virtual environment to reality : Impact of route complexity and subject’s strategy on the exploration mode. *JVRB - Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6(2009)(4). <https://doi.org/10.20385/1860-2037/6.2009.4>
- Wang, L., Mou, W., & Sun, X. (2014). Development of Landmark Knowledge at Decision Points. *Spatial Cognition & Computation*, 14(1), 1-17. <https://doi.org/10.1080/13875868.2013.784768>
- Wen, W., Ishikawa, T., & Sato, T. (2011). Working memory in spatial knowledge acquisition : Differences in encoding processes and sense of direction. *Applied Cognitive Psychology*, 25(4), 654-662. <https://doi.org/10.1002/acp.1737>
- Wen, W., Ishikawa, T., & Sato, T. (2013). Individual Differences in the Encoding Processes of Egocentric and Allocentric Survey Knowledge. *Cognitive Science*, 37(1), 176-192. <https://doi.org/10.1111/cogs.12005>
- Wenzel, F., Hepperle, L., & von Stülpnagel, R. (2017). Gaze behavior during incidental and intentional navigation in an outdoor environment. *Spatial Cognition & Computation*, 17(1-2), 121-142. <https://doi.org/10.1080/13875868.2016.1226838>
- West, G. L., Drisdelle, B. L., Konishi, K., Jackson, J., Jolicoeur, P., & Bohbot, V. D. (2015). Habitual action video game playing is associated with caudate nucleus-dependent navigational strategies. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1808), 20142952. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2952>
- Wiener, J. M., Büchner, S. J., & Hölscher, C. (2009). Taxonomy of Human Wayfinding Tasks : A Knowledge-Based Approach. *Spatial Cognition & Computation*, 9(2), 152-165. <https://doi.org/10.1080/13875860902906496>

- Wiener, J. M., De Condappa, O., & Holscher, C. (2011). Do you have to look where you go? Gaze behaviour during spatial decision making. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 33(33). <https://escholarship.org/uc/item/9n91h72n>
- Wiener, J. M., Hölscher, C., Büchner, S., & Konieczny, L. (2012). Gaze behaviour during space perception and spatial decision making. *Psychological Research*, 76(6), 713-729. <https://doi.org/10.1007/s00426-011-0397-5>
- Wiener, J. M., Kmecova, H., & de Condappa, O. (2012). Route repetition and route retracing : Effects of cognitive aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnagi.2012.00007>
- Winter, S., Tomko, M., Elias, B., & Sester, M. (2008). Landmark Hierarchies in Context. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(3), 381-398. <https://doi.org/10.1068/b33106>
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye-movements and vision*. New-York: Plenum Press.
- Yesiltepe, D., Conroy Dalton, R., & Ozbil Torun, A. (2021). Landmarks in wayfinding : A review of the existing literature. *Cognitive Processing*, 22(3), 369-410. <https://doi.org/10.1007/s10339-021-01012-x>
- Zagermann, J., Pfeil, U., & Reiterer, H. (2016). Measuring Cognitive Load using Eye Tracking Technology in Visual Computing. *Proceedings of the Beyond Time and Errors on Novel Evaluation Methods for Visualization - BELIV '16*, 78-85. <https://doi.org/10.1145/2993901.2993908>

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Représentation du système allocentrique et égocentrique	24
Figure 2. Traduction de la taxonomie de Wiener, Büchner et Hölscher (2009)	25
Figure 3. Aperçu des portes à mémoriser dans l'étude de Waller et Lippa (2007).....	29
Figure 4. Schéma récapitulatif des différents points de repère	30
Figure 5. Exemple d'outils utilisés pour l'oculométrie	46
Figure 6. Illustration des trois types d'intersections du protocole utilisé par Wiener et al. (2011)	54
Figure 7. Aperçu de l'environnement virtuel utilisé par de Condappa et Wiener (2016).....	65
Figure 8. Exemple d'une intersection et des points de repère.....	92
Figure 9. Exemple de carte de saillance d'une intersection	93
Figure 10. Exemple d'une planche des Progressives Matrices Colorées de Raven	95
Figure 11. Procédure expérimentale de l'étude 1	96
Figure 12. Répartition du nombre d'erreurs moyen par intersection en fonction du groupe ..	98
Figure 13. Probabilité d'observation de la direction empruntée en fonction de la durée, du groupe et de l'essai.....	100
Figure 14. Pourcentage de temps passé sur les objets balises et centraux en fonction du groupe et de l'essai	101
Figure 15. Pourcentage de temps passé sur les objets balises congruents et non congruents en fonction du groupe et de l'essai.....	103
Figure 16. Exemple d'un item du test « RAVEN'S 2 - Matrices Progressives » (Raven, 2019)	120
Figure 17. Aperçu des différents itinéraires	121
Figure 18. Zones d'intérêt créées pour les analyses.....	122
Figure 19. Design expérimental de la tâche d'apprentissage d'itinéraire de l'étude 2.....	123

Figure 20. Illustration de la disposition de la salle de passation	125
Figure 21. Nombre d'erreurs moyen par groupe et par itinéraire.....	126
Figure 22. Pourcentage moyen de temps de fixation des repères en fonction des groupes et itinéraires lors du premier essai.....	129
Figure 23. Pourcentage moyen de temps de fixation des repères en fonction des groupes et itinéraires lors du dernier essai.....	129
Figure 24. Pourcentage moyen de temps de fixations des repères congruents et incongruents en fonction du groupe lors du premier essai	131
Figure 25. Pourcentage moyen de temps de fixations des repères congruents et incongruents en fonction du groupe lors du dernier essai	132
Figure 26. Détail de la mesure du diamètre pupillaire pour une intersection pendant un essai	134
Figure 27. Exemple d'un itinéraire de type « non-aidant », inspiré de la figure de Grzeschik et al. (2019)	152
Figure 28. Aperçu d'une intersection et de la carte de saillance	153
Figure 29. Design expérimental de la tâche d'apprentissage d'itinéraires de l'étude 3	154
Figure 30. Temps d'observation moyen des repères saillants ou non saillants en fonction du groupe lors de la première rencontre de la phase de visionnage	159
Figure 31. Phase de visionnage : temps d'observation des repères dans le groupe DT en fonction de la rencontre et du type de repère	161
Figure 32. Phase de visionnage : temps d'observation des repères dans le groupe DI en fonction de la rencontre et du type de repère.....	162
Figure 33. Temps moyen d'observation des repères dans le groupe DT en fonction de l'essai et du type de repère	163

Figure 34. Temps moyen d'observation des repères dans le groupe DI en fonction de l'essai et du type de repère	164
Figure 35. Détail de la mesure du diamètre pupillaire pour une intersection	165
Figure 36. Dilatation pupillaire en fonction du groupe, de la route et de l'essai	166
Figure 37. Rappel des trois environnements virtuels	184

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Ages des participants et scores aux tests cognitifs	91
Tableau 2. Tableau de catégorisation du niveau de saillance visuelle (SV) des points de repère	93
Tableau 3. Nombre d'erreurs et d'essais réalisés par groupe.....	97
Tableau 4. Probabilités moyennes d'observation de la direction empruntée en fonction de la durée, du groupe et de l'essai	99
Tableau 5. Moyennes et résultats des comparaisons des paramètres oculaires dans les groupes	104
Tableau 6. Informations concernant les participants.....	119
Tableau 7. Temps de réponse moyen en fonction du groupe et de l'itinéraire	127
Tableau 8. Dilatation pupillaire en fonction de l'itinéraire, de l'essai et du groupe.....	135
Tableau 9. Âges et scores des participants aux Matrices de Raven's 2	151
Tableau 10. Nombre moyen d'essais, d'erreurs et de temps de réponse par groupe et type de route.....	158

ANNEXES

Annexe 1a. Présentation de la recherche (étude 1)

Struyf Alexandra
alexandra.struyf.etu@univ-lille.fr



Présentation de la recherche sur les déplacements dans un environnement virtuel

Madame, Monsieur,

Je me permets de vous solliciter au sujet d'un travail de recherche effectué dans le cadre d'études en psychologie. Il est sous la direction de Yannick Courbois, enseignant chercheur à l'université de Lille en Psychologie au laboratoire PSITEC. Le thème de recherche porte sur l'étude des stratégies de déplacement utilisées dans un environnement virtuel.

Ce travail de recherche s'inscrivant dans les travaux actuels, il a pour but d'étudier les stratégies utilisées lors d'un déplacement pour améliorer l'accompagnement des personnes ayant des difficultés à se déplacer. L'anonymat sera conservé et les résultats recueillis feront l'objet d'un traitement informatisé conformément à la loi n° 2012-300 du 5 mars 2012 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel.

La première partie de la recherche se déroulera sur ordinateur. Vous allez vous déplacer dans un environnement virtuel à l'aide du clavier de l'ordinateur. L'objectif sera de mémoriser un itinéraire. Pendant que vous serez face à l'ordinateur, un appareil appelé oculomètre sera positionné pour enregistrer les stratégies de déplacement que vous utilisez (ci-dessous, une photographie du matériel utilisé).



Durant la seconde partie de la recherche, vous effectuerez des exercices avec des figures visuelles pour connaître votre raisonnement. Puis, vous classerez des images pour connaître vos préférences.

La durée de la recherche sera d'une trentaine de minutes. Vous êtes libres de participer ou non à cette recherche ainsi que de mettre fin à votre participation à tout moment, ce pour n'importe quel motif et sans conséquences. Nous vous informons également que la participation à la recherche est non rémunérée.

Les résultats de la recherche pourront vous être communiqués à votre convenance et vous être expliqués si vous le souhaitez. Les résultats de cette recherche pourront potentiellement faire l'objet de publications scientifiques. Je vous remercie de l'attention que vous avez portée à ce courrier. Je reste à votre entière disposition si vous souhaitez de plus amples informations.

Je vous prie d'agréer mes salutations distinguées,

Cordialement,

Struyf Alexandra

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Struyf Alexandra'.

Annexe 1b. Présentation de la recherche en langage simplifié (étude 1)

Struyf Alexandra
alexandra.struyf.etu@univ-lille.fr



Présentation travail de recherche en psychologie « Etude des déplacements dans un environnement virtuel »

Madame, Monsieur,

Je vous propose de participer à une recherche pour mes **études de psychologie**.

C'est une recherche encadrée par **un professeur de l'université de Lille** appelé Yannick Courbois.



La recherche étudie **le déplacement des personnes sur un ordinateur**.



Le but de la recherche est d'étudier **comment les personnes se déplacent**.

L'objectif des recherches est **d'aider les personnes qui ont des difficultés à se déplacer**.



Les étapes de l'étude sont :

1. Se déplacer sur un ordinateur pour retrouver un chemin (image en dessous).
2. Faire des exercices avec des images.
3. Ranger des images et dire celles que vous préférez.



La recherche va durer **30 minutes**.



Votre **nom ne sera pas écrit** dans la recherche.



La recherche **respecte les lois sur la protection des personnes.**



Vous avez **le droit de dire oui ou non** pour participer.



Vous avez **le droit d'arrêter la recherche quand vous voulez** et sans conséquences.

Vous **ne recevrez pas d'argent** pour participer à l'étude.



Il est possible que les résultats soient **publiés sur internet.**



Après l'étude, vous pouvez **demander les résultats** et **demander une explication.**

Si vous avez des questions, vous pouvez demander à Alexandra Struyf.



Ou envoyer un mail à cette adresse : alexandra.struyf.etu@univ-lille.fr



Annexe 2a. Formulaire de consentement à la recherche (étude 1)

Struyf Alexandra
alexandra.struyf.etu@univ-lille.fr



Formulaire de consentement libre et éclairé pour l'« Etude sur les déplacements dans un environnement virtuel »

Une participation à l'« Etude sur les déplacements dans un environnement virtuel » m'a été proposée. Les éléments suivants m'ont été expliqués :

- ✓ J'ai lu et compris **la lettre d'information** de la recherche. Par conséquent, j'ai été informé de l'objectif de la recherche et de son déroulé.
- ✓ J'ai été informé de **l'anonymat des données**, ainsi que de leur confidentialité conformément à la loi n° 2012-300 du 5 mars 2012.
- ✓ J'ai été informé de la **non-obligation de participer à cette étude**, ainsi que de ma **possibilité de me retirer de l'étude** à tout moment et ce sans aucune conséquence.
- ✓ J'ai été informé du caractère **non rémunéré** de cette étude.
- ✓ J'ai connaissance de la possible **publication des résultats** dans la littérature scientifique.
- ✓ Je confirme avoir fait part de **mes interrogations quant à la recherche** et avoir obtenu des réponses satisfaisantes.
- ✓ J'ai été informé de ma possibilité de **connaître les résultats de la recherche** ainsi que d'avoir accès à leur explication.

Je confirme les éléments énoncés ci-dessous et je soussigne,

..... (Nom-Prénom)

- accepter de participer à la présente recherche.
- ne pas accepter de participer à la présente recherche.

Date et signature du participant accompagnées de la mention « lu et approuvé » :

Annexe 2b. Formulaire de consentement à la recherche en langage simplifié (étude 1)

Struyf Alexandra
alexandra.struyf.etu@univ-lille.fr



Formulaire de consentement libre et éclairé pour l'« Etude sur les déplacements dans un environnement virtuel »

On m'a proposé de participer à une étude sur les déplacements :

- On m'a donné **un document** qui **explique l'étude**

On a **lu le document avec moi** et on me l'a expliqué



- On m'a raconté **comment va se passer l'étude**

- **J'ai compris** à quoi va servir l'étude



- On m'a dit que **mon nom n'apparaîtra pas** dans la recherche



- On m'a expliqué que la recherche **respecte la loi** sur le respect des personnes



- J'ai compris que **je ne suis pas obligé** de participer à l'étude



- J'ai compris que **j'ai le droit d'arrêter la recherche** quand je veux et sans conséquences



- Je sais que **je ne vais pas recevoir d'argent** pour avoir participé 
- On m'a expliqué que **les résultats peuvent être sur internet** dans un document de recherche 

- On a **répondu à mes questions** sur la recherche 
- Je sais que je pourrais **voir les résultats** et demander que l'on m'explique

Je soussigné,

Nom :Prénom :



Accepte de participer



N'accepte pas de participer

A l'étude sur les déplacements virtuels organisée par Alexandra Struyf.

Date :/...../20....

Ecrire « Lu et approuvé » et signer :

Annexe 3. Consignes et déroulement de la passation (étude 1)

Etape 1 : Rappel de l'objectif de l'étude et relecture avec la personne de la fiche de consentement et recueil à nouveau de l'accord oral de la personne. Répondre aux questions éventuelles.

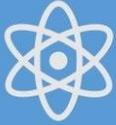
Etape 2 : Calibrage de l'oculomètre : « Installez-vous dans une position confortable face à l'ordinateur. Un point rouge va apparaître au centre de l'écran, il faudra le suivre du regard. » Calibrage. « Pendant le jeu, il faudra essayer de bouger le moins possible et de rester dans la même position. »

Etape 3 : Phase de démonstration et explication du jeu : « Je vais vous présenter un jeu où l'objectif est de trouver le trésor au bout du chemin. Je vais vous montrer le bon chemin qui permet de trouver le trésor. Il faut bien se concentrer pendant ce chemin pour le mémoriser, car vous n'allez le voir qu'une seule fois. Ensuite, vous allez devoir refaire le même chemin pour trouver le trésor. Avez-vous compris le principe ? Pouvez-vous m'expliquer ce que vous avez compris. » (Réexpliquer si besoin). « N'oubliez pas, il faut essayer de bouger le moins possible pendant toute la durée du jeu ».

Etape 4 : Phase de passation : « Je vais lancer la partie où il faut se concentrer pour retenir le chemin. Vous êtes prêt ? » Lancement de la démonstration. « Maintenant c'est à vous, vous devez refaire le chemin pour trouver le trésor. Si vous souhaitez tourner à droite (effectuer le geste en indiquant la direction sur l'écran), vous appuyez sur cette flèche. Si vous souhaitez tourner à gauche (effectuer le geste en indiquant la direction sur l'écran), vous appuyez sur cette flèche-ci. Le coffre avec le trésor ne s'ouvrira que si vous faites le bon chemin. Ne vous inquiétez pas, vous avez le droit de faire des erreurs. Quand vous ferez une erreur un rond rouge apparaîtra sur l'écran et vous pourrez modifier votre réponse. Vous avez le droit à plusieurs essais pour trouver le trésor. Pouvez-vous me réexpliquer les touches à utiliser pour choisir un chemin ? » (Réexpliquer si besoin) « Vous êtes prêt ? ».

Etape 5 : Passation des matrices de Raven

Annexe 4. Poster de restitution des résultats de la recherche en langage simplifié



Recherche scientifique à l'ESAT

« *Nom de l'établissement* »



Les participants





Ce qu'on a fait

Participation à une recherche scientifique sur le déplacement avec l'université de Lille

Sur un ordinateur, on a joué à un jeu où il fallait retenir un chemin pour gagner

Ensuite on a répondu à des questions sur les objets du chemin que l'on préférerait



Pourquoi ?

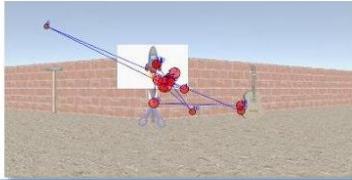
L'objectif de la recherche est d'aider les personnes qui ont des difficultés à se déplacer dans la rue



Les résultats

Les résultats ont montré que les difficultés à se déplacer peuvent être expliqués par:

- La manière de regarder le chemin et l'environnement (le sol, les murs, le ciel)
- Les objets que l'on regarde sur le chemin
- Certains objets sont moins regardés parce qu'ils sont sur les côtés plutôt que le centre



Ce que ça va apporter

Les résultats pourront aider à créer un GPS pour les piétons

Les résultats pourront aider à créer des exercices d'entraînement

Les résultats aideront les prochaines recherches

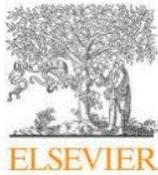



Annexe 5. Article publié relatif à l'étude 1

G Model
PSFR-565; No. of Pages 20

ARTICLE IN PRESS

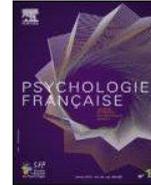
Psychologie française xxx (xxxx) xxx–xxx



Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com

ScienceDirect

et également disponible sur www.em-consulte.com



Article original

Étude des stratégies d'orientation des personnes présentant une déficience intellectuelle par une approche oculométrique

Study of wayfinding strategies of people with intellectual disabilities using an eye-tracking approach

A. Struyf^{a,*}, L. Sparrow^b, Y. Courbois^a

^a Université Lille, ULR 4072–PSITEC–Psychologie : Interactions, Temps, Emotions, Cognition, 59000 Lille, France

^b Université Lille, CNRS, UMR 9193–SCALab–Sciences Cognitives et Sciences Affectives, 59000 Lille, France

INFORMATIONS

Historique de l'article :
Reçu le 27 février 2023
Accepté le 16 avril 2024
Disponible sur Internet le xxx

Mots clés :
Déficience intellectuelle
Navigation spatiale
Oculométrie
Points de repère
Environnement virtuel

RÉSUMÉ

Introduction. – Les personnes présentant une déficience intellectuelle (DI) éprouvent des difficultés dans la mémorisation et la sélection des points de repère.

Objectif. – L'objectif de cette étude est d'investiguer les différences d'observation des points de repère lors d'une tâche d'apprentissage de chemins en environnement virtuel.

Méthode. – Les mouvements oculaires de 19 personnes avec une DI et 11 personnes au développement typique ont été comparés dans une tâche d'apprentissage d'un itinéraire comportant 12 intersections en Y.

Résultats. – Les résultats montrent que les participants avec une DI observent davantage les zones sans points de repère et ont un temps d'observation inférieur des repères congruents avec la direction à emprunter. De même la concordance entre la direction prise par le regard (droite ou gauche) et la réponse de direction émise par le participant (vers la droite ou vers la gauche) est plus élevée chez les personnes au développement typique.

* Auteur correspondant. Laboratoire PSITEC, université Lille Nord-de-France, BP60140, 59653 Villeneuve d'Ascq cedex, France.
Adresse e-mail : alexandra.struyf@univ-lille.fr (A. Struyf).

<https://doi.org/10.1016/j.psfr.2024.04.001>

0033-2984/© 2024 Société Française de Psychologie. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Pour citer cet article : A. Struyf, L. Sparrow and Y. Courbois Étude des stratégies d'orientation des personnes présentant une déficience intellectuelle par une approche oculométrique, *Psychol. fr.*, <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2024.04.001>

Annexe 6a. Présentation de la recherche (étude 2)



Lettre d'information

pour les participants à la recherche intitulée :

Étude des capacités de déplacement en environnements virtuels par une approche oculométrique

Université de Lille
Unité de recherche PSITEC
59650 Villeneuve-d'Ascq
Tel : 03 20 41 63 47

Responsable scientifique de la recherche :

Yannick COURBOIS
Laboratoire PSITEC
Adresse Mail : yannick.courbois@univ-lille.fr

Coordinatrice scientifique

Alexandra STRUYF
Laboratoire PSITEC
Adresse Mail : alexandra.struyf.etu@univ-lille.fr

Mail du délégué à la protection des données de l'université de Lille : dpo@univ-lille.fr

Merci de bien vouloir lire la note d'information ci-jointe.

Si vous acceptez de prendre part à l'étude :

- *L'investigatrice vous contactera pour fixer un rendez-vous*
- *Une fois sur place, vous signerez un formulaire de consentement avant de participer à l'étude*

Madame, Monsieur,

Le présent document décrit l'étude à laquelle il vous est proposé de participer. Il résume les informations actuellement disponibles en répondant à plusieurs questions que vous pouvez vous poser dans le cadre de votre participation à cette recherche.

Avant de choisir d'y participer ou non, il est important que vous preniez connaissance de son but et de ce qu'elle implique.

Pourquoi me propose-t-on de participer à cette étude ?

Cette étude vous est proposée car vous êtes une personne ayant recouru aux déplacements dans la rue pour vous rendre à votre lieu de travail/d'étude, vos loisirs etc. Ainsi, vous utilisez des stratégies de déplacement qui vous sont propres et vous permettent de vous repérer dans votre environnement au quotidien.

Quels sont les objectifs de la recherche ?

L'objectif principal de cette étude est d'étudier grâce aux mouvements des yeux comment les personnes observent leur environnement lors de leurs déplacements.

Cette étude cherche également à déterminer quels éléments de l'environnement et quelles caractéristiques personnelles sont impliqués dans les capacités de déplacement.

Comment va se dérouler la recherche ?

La recherche se déroulera en une seule séance d'une durée de 1 heure 30 minutes environ.

Vous allez être positionné assis face à un ordinateur où vont figurer des environnements virtuels qui représentent des trajets. Une barre d'oculométrie (appareil d'analyse du mouvement des yeux) sera positionnée sur l'ordinateur pour pouvoir mesurer la manière dont vous regardez l'environnement.

L'expérience se déroulera en plusieurs phases :

- **Phase 1 : la mesure des capacités d'induction/déduction :** plusieurs images vont vous être présentées. Il vous sera demandé de déduire l'image la mieux appropriée à la situation.
- **Phase 2 : la calibration :** vous serez amené à suivre du regard des points se déplaçant sur l'écran. Cette phase a pour objectif de paramétrer le matériel.
- **Phase 3 : l'apprentissage d'itinéraire :** une vidéo d'itinéraire à apprendre vous sera présentée. Suite à celle-ci, vous serez amené à retrouver le trajet correct en vous aidant du clavier pour donner vos réponses. Vous serez amené à faire cet exercice pour 4 trajets différents.
- **Phase 4 : questionnaire des déplacements :** Vous serez amenés à répondre à un court questionnaire pour connaître vos déplacements au quotidien.

Que se passera-t-il à la fin de ma participation à cette recherche ?

A la fin de la recherche, un temps sera pris avec vous si vous avez des questions ou remarques sur l'étude. De même, vous pourrez si vous le souhaitez, recevoir une lettre d'information par mail reprenant les résultats principaux de la recherche à laquelle vous avez participé ainsi que leurs implications dans le domaine de la recherche et de la prise en charge.

Quels sont les bénéfices attendus de ma participation à l'étude ?

Votre participation à cette étude pourra contribuer à l'accroissement des connaissances que nous possédons sur les difficultés de déplacements rencontrées par les personnes présentant un handicap mental.

De même, cette recherche pourra grâce aux résultats inspirer la conception de systèmes d'aide à la navigation (GPS) pour piétons.

Ma participation à l'étude comporte-t-elle des risques et/ou des contraintes particulières ?

Votre participation à cette étude n'entraînera pas de participation financière de votre part. Mis à part le temps passé pendant l'expérimentation, vous ne serez pas sollicité pour d'autres raisons.

Le matériel d'oculométrie utilisé appartient à la société Tobii (leader mondial de l'analyse oculaire) qui produit du matériel de haute technologie destiné à la recherche scientifique. L'ensemble du matériel proposé par cette société a été testé et approuvé par des laboratoires certifiés conformément à la norme européenne CEI/EN 62471. Si vous souhaitez plus d'informations sur le matériel vous pouvez

consulter la page <https://help.tobii.com/hc/en-us/articles/212372449-Safety-guidelines>.

Quels sont mes droits en tant que participant à la recherche ?

Vous êtes totalement libre d'accepter ou de refuser de participer à cette étude sans avoir à vous justifier et sans conséquence pour vous.

Vous disposez du temps que vous estimez nécessaire pour prendre la décision de participer à l'étude.

En cas d'acceptation, vous pourrez à tout moment revenir sur votre décision, sans nous en préciser la raison par simple mail au Responsable scientifique de la Recherche.

Dans le cadre de cette étude, un traitement de vos données personnelles sera mis en œuvre.

Conformément aux articles 15 et suivants du règlement général sur la protection des données, vous disposerez des droits suivants :

- **Accès** : droit d'obtenir la communication de vos données personnelles en notre possession
- **Information** : droit d'obtenir des informations sur le traitement en particulier, ses finalités, les catégories de données traitées, leur source, le nom du responsable du traitement et du délégué à la protection des données, les destinataires ou catégories de destinataires des données, le transfert hors union européenne, vos droits d'accès, de rectification, d'effacement, de limitation du traitement, ainsi que du droit de s'opposer au traitement et du droit à la portabilité des données, droit de retirer votre consentement à tout moment, droit d'introduire une réclamation auprès d'une autorité de contrôle
- **Rectification** : droit de demander la rectification des données personnelles inexactes ou incomplètes
- **Effacement** : droit de demander l'effacement des informations déjà collectées (sauf si la procédure prévoyait un procédé d'anonymisation et que ce procédé a été exécuté au préalable de cette demande)
- **Limitation du traitement** : droit de demander la limitation du traitement ; les données pourront être conservées mais ne seront traitées qu'avec votre consentement
- **Portabilité des données** : le droit de recevoir les données que vous avez fournies et de les transmettre à un autre responsable du traitement, ou de demander que les données soient transmises directement d'un responsable du traitement à un autre

Vous pourrez exercer ces droits liés au traitement de vos données personnelles en vous adressant au **Responsable scientifique de la recherche** à l'initiative de cette étude.

Comment sont gérées vos données personnelles ?

Le responsable du traitement est l'université de Lille. Le traitement est fondé sur l'article 6.1 du Règlement Général sur la Protection des Données, les bases légales sont votre consentement et l'exécution d'une mission d'intérêt public.

Dans le cadre de cette étude, un traitement de vos données personnelles sera mis en œuvre pour permettre d'analyser les résultats. Ces données seront identifiées par un numéro de code.

Ces données sont susceptibles d'être utilisées dans le cadre de l'étude et d'être traitées par le responsable scientifique ou les personnes placées sous son autorité et astreintes à une obligation de confidentialité.

L'ensemble des données recueillies pendant l'expérimentation seront anonymisées par un système de code grâce à un fichier de correspondance.

Les données personnelles (nom, prénom, formulaire de consentement) seront conservées pendant la durée de l'étude jusqu'à la publication des résultats de l'étude dans le système d'information de l'organisme responsable de la recherche, puis seront archivées pendant 10 ans à l'issue de l'étude. Les responsables scientifiques pourront accéder à ces données à des fins de recherche scientifiques ultérieures pour une finalité compatible avec l'objectif de l'étude uniquement : vous recevrez préalablement les informations sur ce traitement qui fera l'objet des formalités réglementaires applicables.

A qui dois-je m'adresser en cas de questions ou de problèmes ?

Vous pouvez poser toutes les questions que vous souhaitez, avant, pendant et après l'étude en vous adressant à Alexandra STRUYF par mail : alexandra.struyf.etu@univ-lille.fr

Si vous n'obtenez pas de réponses à vos questions dans un délai d'un mois, vous pouvez porter réclamation auprès de la CNIL.

L'ensemble de l'équipe de recherche, vous remercie d'avance pour l'intérêt que vous porterez à cette étude.

COURBOIS Yannick

Professeur des universités



SPARROW Laurent

Maitre de Conférence



STRUYF Alexandra

Doctorante



Annexe 6b. Présentation de la recherche en langage simplifié (étude 2)



Présentation du travail de recherche
pour l'étude sur :
Les déplacements en environnements virtuels

On vous propose de **participer** à
une **recherche**
sur les **déplacements**



La recherche est faite
avec l'**université de Lille**
avec le **professeur Yannick Courbois**



La recherche étudie
le **déplacement des personnes**
sur un **ordinateur**



Le but de la recherche est
d'**aider les personnes**
avec des **difficultés à s'orienter**



Pendant la recherche **vous allez**

1. vous déplacer sur un **ordinateur**



2. faire des **exercices avec des images**



3. répondre à des **questions**



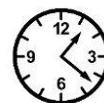
La recherche va se faire en **2 fois**

Une première fois pendant

45 minutes

Une deuxième fois pendant

1 heure



Votre nom n'apparaîtra pas dans la recherche



La recherche **respecte les lois** sur la **protection des personnes**



Vous avez **le droit** de dire **oui ou non** pour participer



Vous avez le droit d'**arrêter la recherche quand vous voulez** et **sans conséquences**



Vous ne recevrez **pas d'argent** pour **participer à l'étude**



Les résultats de la recherche seront publiés **sur internet**



Après l'étude vous pourrez **voir les résultats** et demander une **explication**



Si vous avez **des questions**
vous pouvez **demande**
à **Struyf Alexandra**



Ou

Envoyer **un mail** à
alexandra.struyf.etu@univ-lille.fr



Annexe 7a. Formulaire de consentement à la recherche (étude 2)



Formulaire de consentement de participation à une recherche intitulée :

**Étude des capacités de déplacement en environnements virtuels par une approche
oculométrique**

Organisme responsable de l'étude :

Université de Lille
Laboratoire PSITEC
59650 Villeneuve-d'Ascq
tél : 03 20 41 63 47

Responsable scientifique de la recherche

Pr Yannick COURBOIS
Université de Lille – Laboratoire PSITEC
59650 Villeneuve-d'Ascq
Tel: 03 20 41 63 77 Mail : yannick.courbois@univ-lille.fr
Mail de Jean-Luc Tessier délégué à la protection des
données : jean-luc.tessier@univ-lille.fr

Investigateur Principal :

Alexandra STRUYF
Université de Lille
Doctorante au laboratoire PSITEC
Mail : alexandra.struyf@univ-lille.fr

Je soussigné-e Mme, M. (barrer la mention inutile), accepte librement et volontairement de participer à la recherche intitulée : **Etude des capacités de déplacement en environnements virtuels par une approche oculométrique** dont le Professeur Yannick COURBOIS est responsable et qui m'a été proposée par Alexandra Struyf (alexandra.struyf@univ-lille.fr).

Etant entendu que :

- L'investigateur qui m'a informé(e) et a répondu à toutes mes questions m'a précisé que ma participation à cette étude est libre et que je peux arrêter d'y participer à tout moment en l'informant préalablement.
- J'ai été clairement informé(e) des éléments suivants : But de la recherche – Méthodologie – Durée de ma participation – Bénéfices attendus – Contraintes – Risques prévisibles ; j'ai pris connaissance de la note d'information m'expliquant cette étude.
- Si je le souhaite, je serai informé(e) par le responsable scientifique des résultats globaux de cette recherche selon les modalités figurant dans la note d'information qui m'a été remise.
- Mon consentement ne décharge en rien le responsable scientifique et l'organisme responsable de la recherche de l'ensemble de leurs responsabilités et je conserve tous mes droits garantis par la loi.
- L'investigateur et/ou moi-même pourrions être contactés ou recontactés afin de compléter les éventuelles données manquantes des questionnaires.
- J'accepte que les données enregistrées à l'occasion de cette recherche puissent faire l'objet d'un traitement informatisé par l'organisme responsable de la recherche. Les données recueillies demeureront strictement confidentielles. J'ai bien noté que le droit d'accès prévu par règlement général sur la protection des données s'exerce à tout moment auprès de l'investigateur qui me suit dans le cadre de la recherche et qui connaît mon identité. Je pourrai exercer mon droit de rectification et d'opposition, d'effacement, de limitation et de portabilité auprès de ce même investigateur, qui contactera l'organisme responsable de la recherche pour faire valoir mes droits.

Fait à le.....

Fait à le.....

Signature du/de la **participant(e)**
accompagnée de la mention « lu et approuvé »,

Signature de l'**investigateur/trice**,

Le présent formulaire est réalisé en deux exemplaires, dont un est remis à l'intéressé, ou à son représentant légal (pour les majeurs sous tutelle ou sous curatelle). Un exemplaire sera conservé par l'investigateur ; en toute confidentialité, conformément à la loi.

Annexe 7b. Formulaire de consentement à la recherche en langage simplifié (étude 2)



Présentation du travail de recherche pour l'étude sur : **Les déplacements en environnements virtuels**

On vous propose de **participer** à
une **recherche**
sur les **déplacements**



La recherche est faite
avec l'**université de Lille**
avec le **professeur Yannick Courbois**



La recherche étudie
le **déplacement des personnes**
sur un **ordinateur**



Le but de la recherche est
d'**aider les personnes**
avec des **difficultés à s'orienter**



Pendant la recherche **vous allez**

1. vous déplacer sur un **ordinateur**



2. faire des **exercices avec des images**



3. répondre à des **questions**



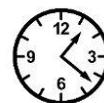
La recherche va se faire en **2 fois**

Une première fois pendant

45 minutes

Une deuxième fois pendant

1 heure



Votre nom n'apparaîtra pas dans la recherche



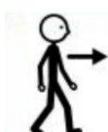
La recherche **respecte les lois** sur la **protection des personnes**



Vous avez **le droit** de dire **oui ou non** pour participer



Vous avez le droit d'**arrêter la recherche quand vous voulez** et **sans conséquences**



Vous ne recevrez **pas d'argent** pour **participer à l'étude**



Les résultats de la recherche seront publiés **sur internet**



Après l'étude vous pourrez **voir les résultats** et demander une **explication**

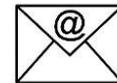


Si vous avez **des questions**
vous pouvez **demande**
à **Struyf Alexandra**



Ou

Envoyer **un mail** à
alexandra.struyf.etu@univ-lille.fr



Annexe 8. Consignes et déroulement de la passation (étude 2)

Etape 1 : Rappel de l'objectif de l'étude, lecture avec la personne de la fiche de consentement et recueil de l'accord de consentement.

Etape 2 : Calibrage de l'oculomètre : « Installez-vous dans une position confortable face à l'ordinateur en sachant que vous allez devoir utiliser les touches suivantes. Nous allons procéder au calibrage. Un point va apparaître à l'écran, il faudra le suivre du regard. » Calibrage. « Pendant le jeu, il faudra essayer de bouger le moins possible et de rester dans la même position. »

Etape 3 : Phase de démonstration et explication du jeu :

« Je vais vous présenter un jeu où l'objectif est de retrouver le bon chemin. Il faut bien se concentrer pendant ce chemin pour le mémoriser car vous n'allez le voir **qu'une seule fois**. Ensuite, vous allez devoir refaire le même chemin deux fois de suite pour gagner. Avez-vous compris le principe ?» *(Réexpliquer si besoin)*. « En tout, vous aurez 4 chemins à mémoriser ».

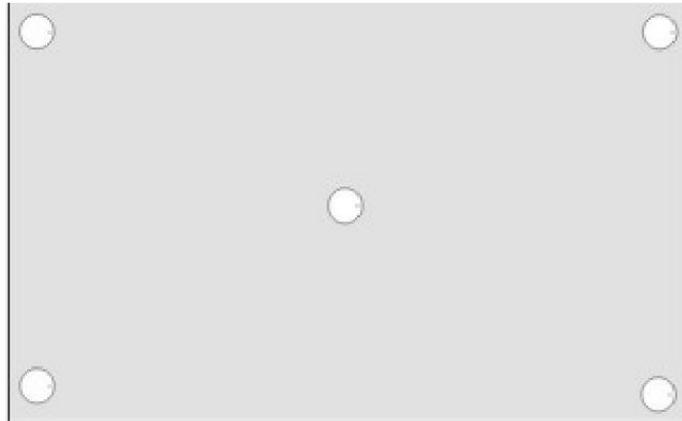
« Si vous souhaitez tourner à droite (*effectuer le geste en indiquant la direction sur l'écran*), vous appuyez sur cette flèche. Si vous souhaitez tourner à gauche (*effectuer le geste en indiquant la direction sur l'écran*), vous appuyez sur cette flèche-ci. »

« Ne vous inquiétez pas, vous avez le droit de faire des erreurs. Quand vous ferez une erreur une croix rouge apparaîtra sur l'écran. Vous avez le droit à plusieurs essais pour trouver le bon chemin» *(Réexpliquer si besoin)*

Etape 4 : Phase de passation : « Je vais lancer la partie où il faut se concentrer pour retenir le chemin. Vous êtes prêt ? » Lancement de la démonstration. « Maintenant c'est à vous, vous devez refaire le chemin. »

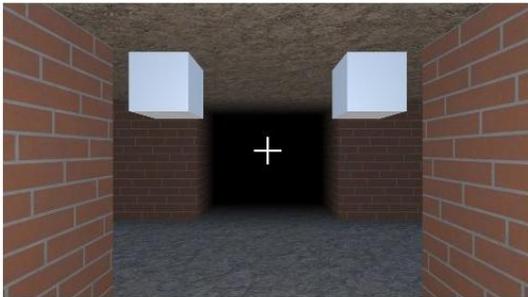
Annexe 9. Consignes de passation simplifiées (étude 2)

On commence par une phase de calibration : vous devez suivre avec vos yeux le point qui va apparaître à l'écran.

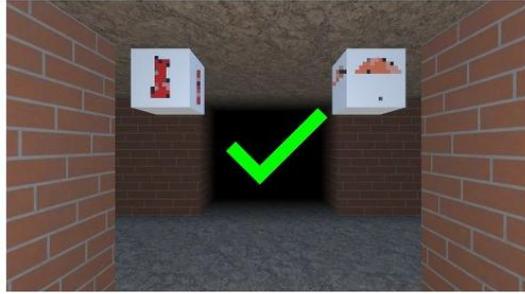
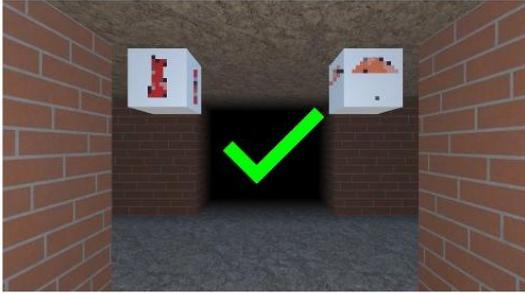


On va commencer le jeu. Le but du jeu est de retrouver le bon chemin sans faire d'erreurs. On va vous montrer une vidéo et vous devrez ensuite refaire le chemin.

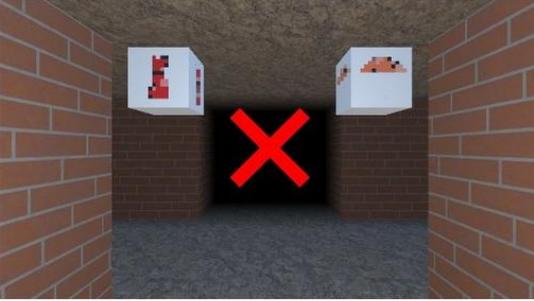
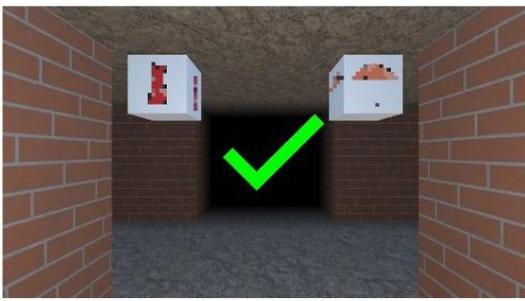
Quand vous serez en train de refaire le bon chemin, vous arriverez à un croisement (montrer la photo) vous avez une croix qui apparaît au centre de l'écran. Vous devez attendre que la croix ait disparu pour pouvoir répondre (montrer photo). Vous devez indiquer si on doit tourner à gauche avec la flèche gauche ou à droite avec la flèche droite (montrer les touches sur le clavier).



Pour gagner, vous devez réussir à refaire tout le chemin sans erreur, 2 fois.



Quand vous avez bon, un symbole vert apparaît à l'écran. Quand vous faites une erreur, une croix rouge apparaît à l'écran.



Vous avez plusieurs chances pour pouvoir gagner et c'est normal si vous faites des erreurs.



• • •

Annexe 10. Questionnaire de mesure de la fréquence des déplacements et d'usage des jeux vidéo (étude 2 et 3)

Code participant : Date de Passation :

Age (en mois) : Sexe :

Questionnaire de mesure de la fréquence des déplacements

Veillez cocher la case correspondant le mieux aux déplacements que vous réalisez au quotidien.

1. À quelle fréquence vous déplacez-vous seul en marchant dans la rue ?

- Jamais Quelques fois dans le mois Une à 3 fois par semaine
 Plus de 3 fois par semaine Tous les jours

2. À quelle fréquence vous déplacez-vous accompagné en marchant dans la rue ?

- Jamais Quelques fois dans le mois Une à 3 fois par semaine
 Plus de 3 fois par semaine Tous les jours

3. À quelle fréquence êtes-vous amené à réaliser des trajets non habituels à pied ?

- Jamais Quelques fois dans le mois Une à 3 fois par semaine
 Plus de 3 fois par semaine Tous les jours

Questionnaire de mesure de la fréquence d'utilisation des jeux vidéo

Veillez cocher la case ou indiquer le nombre d'heures correspondant le mieux aux activités que vous avez réalisé au cours des six derniers mois.

1. À quelle fréquence jouez-vous à des jeux vidéo ?

- Jamais Rarement Parfois Fréquemment Souvent

2. Combien d'heures par semaine jouez-vous à des jeux vidéo de tirs à la première personne tels que Call of Duty ?

3. Combien d'heures par semaine jouez-vous à des jeux vidéo de rôle (jeux où vous incarnez un personnage) tels que Zelda ?

4. Combien d'heures par semaine jouez-vous à des jeux de simulateurs tels que du pilotage d'avion ou de voiture ?

5. Combien d'heures par semaine jouez-vous à des jeux de plateforme et/ou d'action tels que Grand Theft auto (GTA) ?

6. Combien d'heures par semaine jouez-vous à des jeux vidéo de sport tels que FIFA ?

Annexe 11. Communication orale relative à l'étude 1 et 2 en langage simplifié

12^{ème} conférence ALTER, 4-5 juillet 2024



La sélection des points de repère des personnes présentant une déficience intellectuelle : études en oculométrie

A. Struyf, L. Sparrow, J. Lecerf, & Y. Courbois

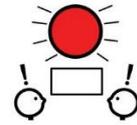


Que disent les études ?



Littérature

• Se déplacer **c'est important.**



• On en a besoin pour :

- aller au travail
- voir ses proches
- aller chez le médecin
- faire des activités...



• Les personnes avec une DI se déplacent peu tous les jours.



Littérature

• Pourquoi ?



• C'est difficile d'apprendre un chemin.



• C'est difficile de savoir quels points de repère apprendre.

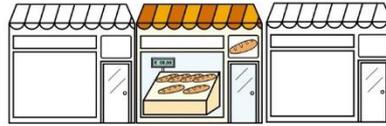


Littérature

- C'est quoi **un point de repère** ?



- C'est souvent un bâtiment qui est différent des autres.



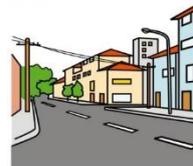
- Il **aide à apprendre** un chemin.

- Il peut être :
 - plus coloré,
 - plus grand,
 - plus connu,
 - ou bien placé.



Littérature

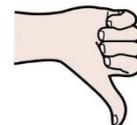
- Dans la rue il y a beaucoup de points de repère.



- Il y a des points de repère **faciles à apprendre**.



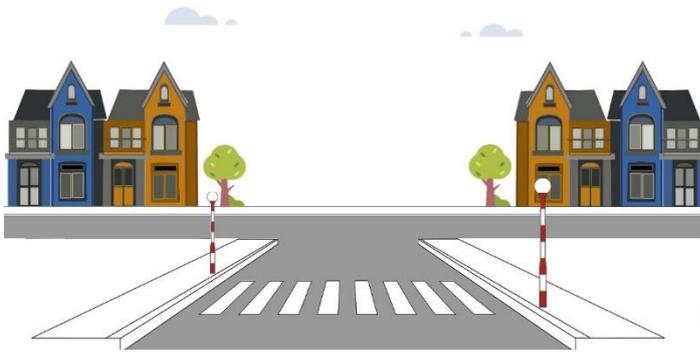
- Mais, il y a des points de repère **difficiles à apprendre**.



Littérature

Les repères **difficiles à apprendre** :

- Les repères **associatifs**.

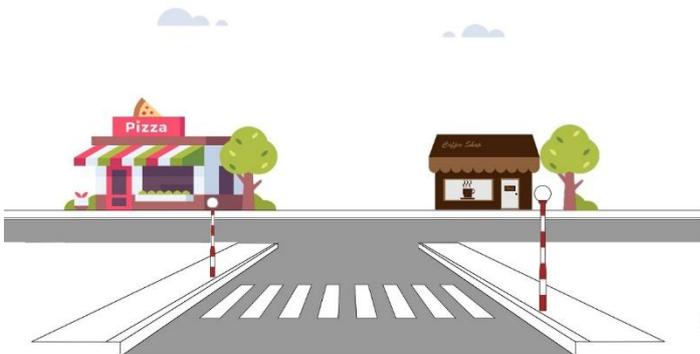


Aux maisons,
je tourne à gauche

Littérature

Les repères **faciles à apprendre** :

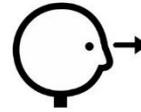
- Les repères **balises**.



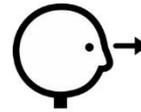
Je vais vers
la pizzeria

Littérature

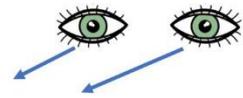
- **Quand on regarde longtemps** un point de repère on va souvent l'apprendre.



- Pour savoir ce que regardent les personnes on utilise l'**oculométrie**.

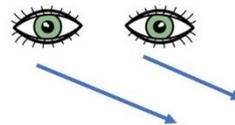


- L'**oculométrie** est une barre qui **enregistre ce que font les yeux**.



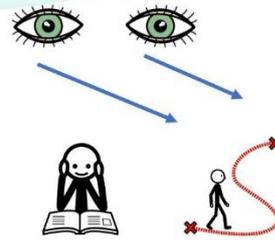
Littérature

- Il n'y a **pas beaucoup d'études** sur ce que regardent les personnes avec une DI quand elles se déplacent.



Objectifs des études

- **Mesurer les mouvements des yeux** des personnes pendant qu'elles apprennent un chemin.



- **Comparer** les deux groupes et les points de repère.

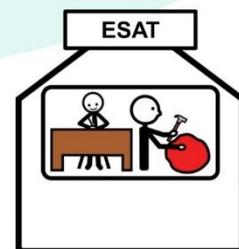


Participants des études

- Un groupe de participants en ESAT et IMPRO.



19 et 21



- Un groupe de participants étudiants et salariés.



11 et 21



Etude 1



Méthode de l'étude 1

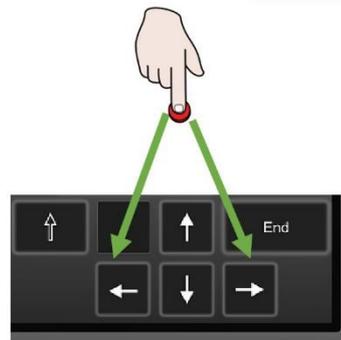
- Apprentissage d'un chemin avec 12 intersections



12



- 10 essais maximum



Méthode de l'étude 1

- A chaque intersection il y a 4 points de repère :

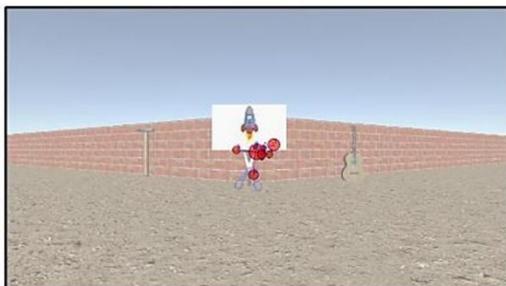


- 1 à droite
- 1 à gauche
- 2 au centre

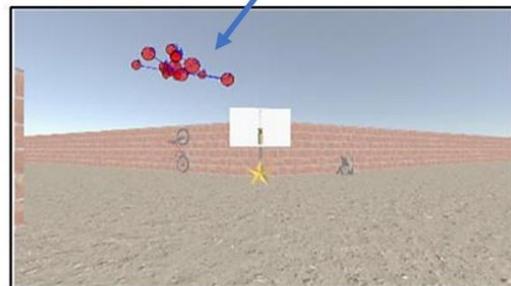


Résultats de l'étude 1

- Les personnes avec une DI observent plus l'environnement.



Participant du groupe DT



Participant du groupe DI

Etude 2

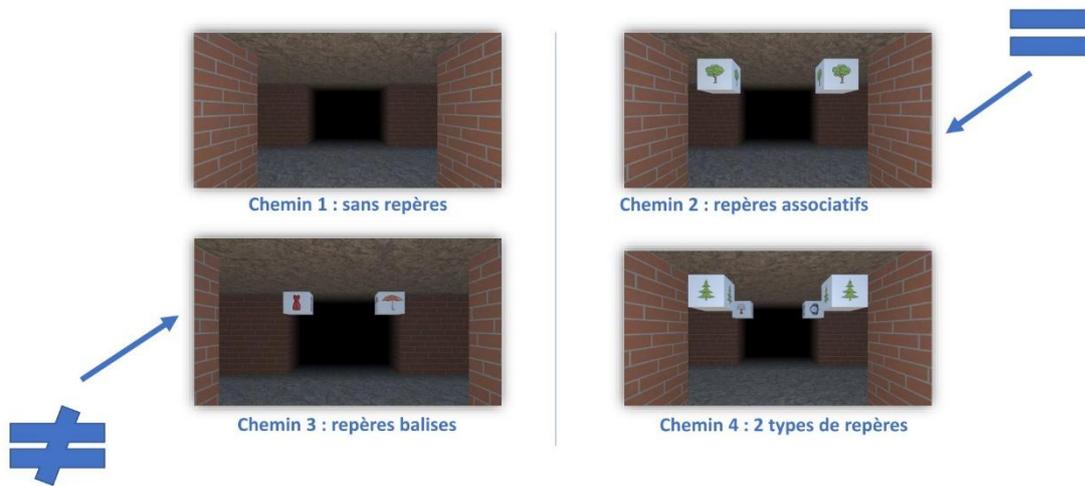


Méthode de l'étude 2

- Apprentissage de 4 chemins avec 8 intersections
- 10 essais maximum



Méthode de l'étude 2



Résultats de l'étude 2

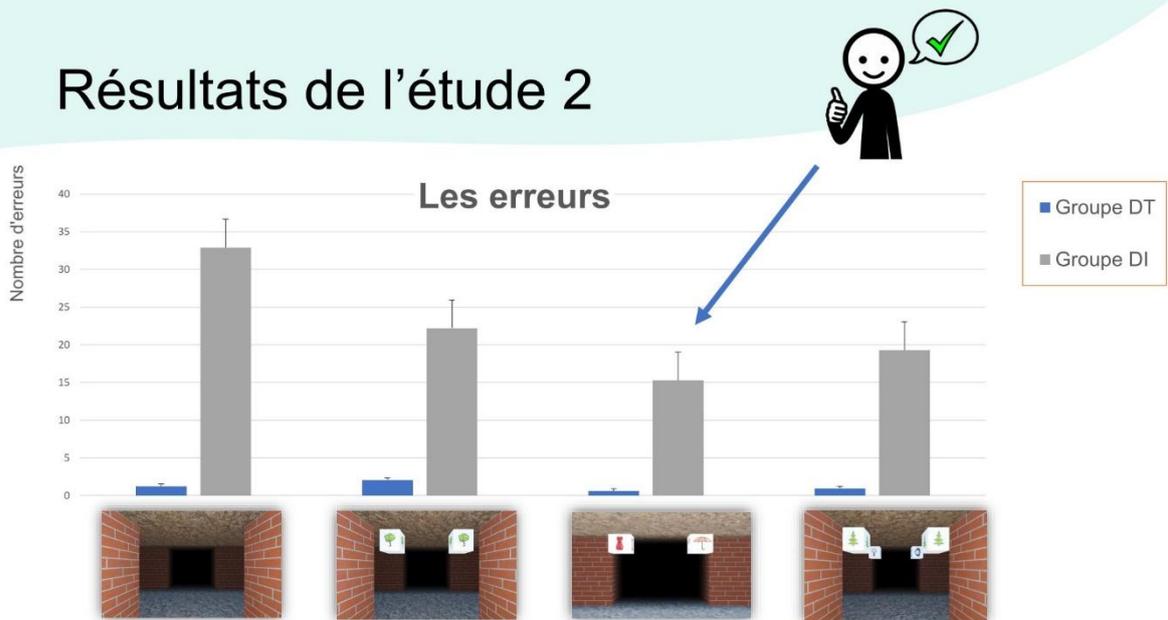


Figure 1. Nombre d'erreurs moyen par groupe et par itinéraire

Résultats de l'étude 2

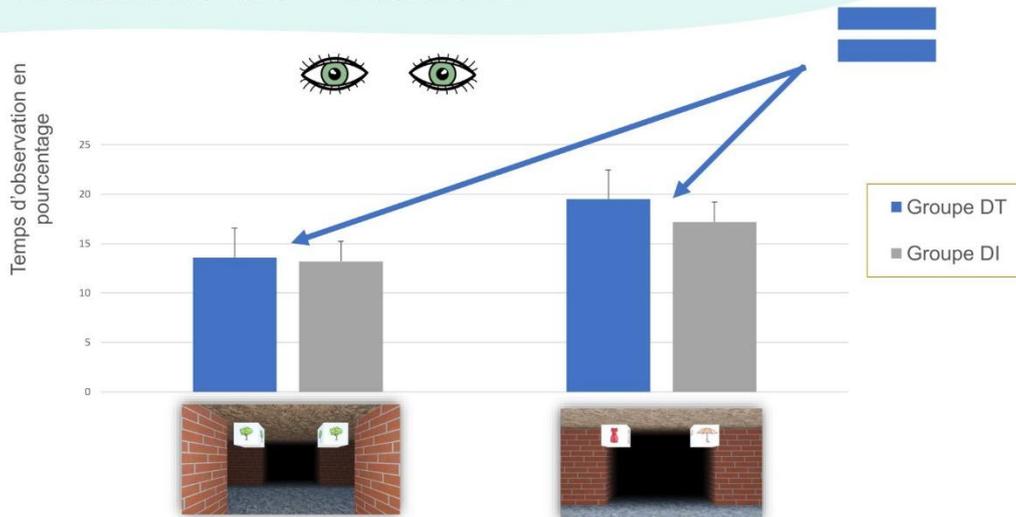


Figure 2. Pourcentage moyen de temps d'observation des repères lors du premier essai

Résultats de l'étude 2

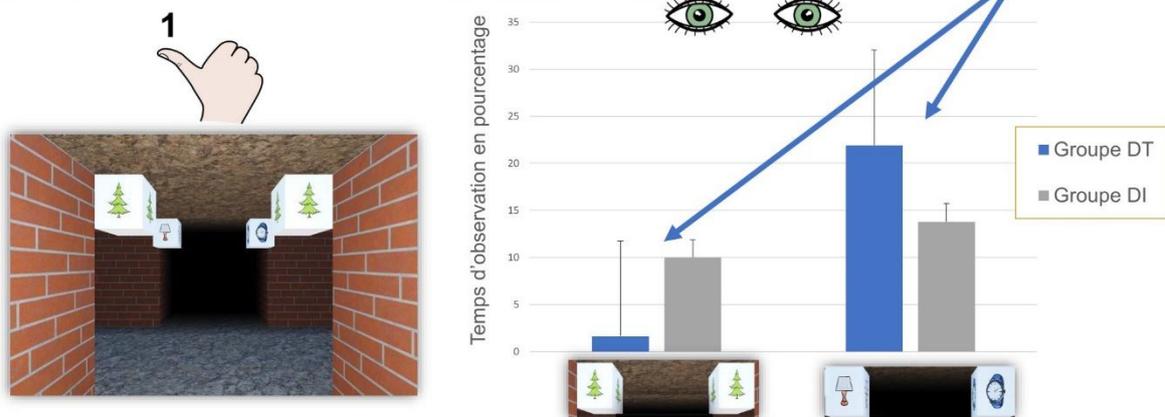


Figure 3. Pourcentage moyen de temps d'observation des repères lors du premier essai de l'itinéraire 4

Résultats de l'étude 2

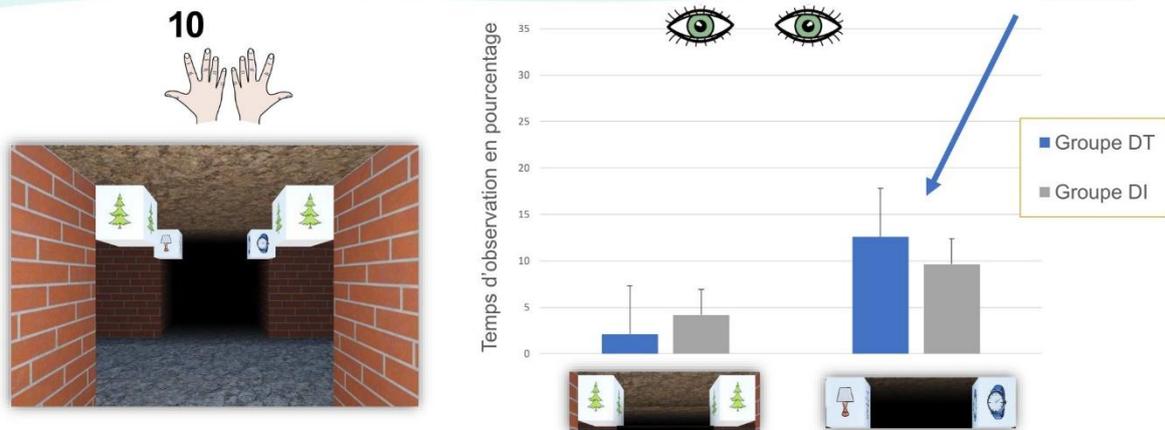


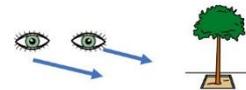
Figure 4. Pourcentage moyen de temps d'observation des repères lors du dernier essai de l'itinéraire 4

Discussion

• Il y a des différences entre les deux groupes :



• Les personnes avec une DI **observent plus l'environnement.**



• Elles **observent moins les repères qui les aident.**

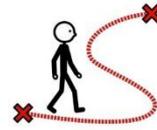


• C'est **possible d'apprendre à regarder** les points de repère qui sont les plus aidants.



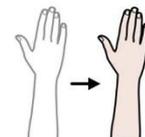
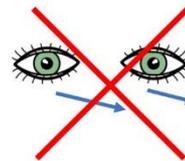
Discussion

- C'est important de créer des chemins avec **les repères balises**.
- Il faudrait **faire des programmes** pour apprendre à sélectionner les repères balises.
- Les **applications GPS** devraient utiliser **les repères balises**.



Limites

- Les recherches sont sur **ordinateurs**.
- Tous les mouvements de yeux n'ont pas pu être enregistrés car **les participants bougeaient**.



Conclusion

- L'oculométrie **aide à mieux comprendre** les difficultés de déplacement.



- Les difficultés de déplacement peuvent être améliorées avec **l'apprentissage** et **les GPS adaptés**.



Annexe 12a. Présentation de la recherche (étude 3)



Lettre d'information
pour les participants à la recherche intitulée :
Etude de la prise d'informations visuelles lors des déplacements en environnements virtuels

Université de Lille
Unité de recherche PSITEC
59650 Villeneuve-d'Ascq
Tél. : 03 20 41 63 47

Responsable scientifique de la recherche :
Yannick COURBOIS
Laboratoire PSITEC
Adresse Mail : yannick.courbois@univ-lille.fr

Coordinateur scientifique
Alexandra STRUYF
Laboratoire PSITEC
Adresse Mail : alexandra.struyf@univ-lille.fr

Mail du délégué à la protection des données de l'université de Lille : dpo@univ-lille.fr

Merci de bien vouloir lire la note d'information ci-jointe.

Si vous acceptez de prendre part à l'étude :

- *L'investigatrice vous contactera pour fixer un rendez-vous*
- *Une fois sur place, vous signerez un formulaire de consentement avant de participer à l'étude*

Madame, Monsieur,

Le présent document décrit l'étude à laquelle il vous est proposé de participer. Il résume les informations actuellement disponibles en répondant à plusieurs questions que vous pouvez vous poser dans le cadre de votre participation à cette recherche.

Avant de choisir d'y participer ou non, il est important que vous preniez connaissance de son but et de ce qu'elle implique.

Pourquoi me propose-t-on de participer à cette étude ?

Cette étude vous est proposée, car vous êtes une personne ayant recours aux déplacements dans la rue pour vous rendre à votre lieu de travail/d'étude, vos loisirs, etc. Ainsi, vous utilisez des stratégies de déplacement qui vous sont propres et vous permettent de vous orienter dans votre environnement au quotidien.

Plusieurs critères rentrent en compte pour pouvoir participer à cette étude :

- être âgé de 18 ans à 40 ans maximum
- ne pas présenter de troubles oculaires, de type nystagmus ou myopie par exemple
- ne pas présenter de troubles épileptiques de type photosensible

Quels sont les objectifs de la recherche ?

L'objectif principal de cette étude est d'étudier grâce aux mouvements des yeux comment les personnes observent leur environnement lors de leurs déplacements.

Cette étude cherche également à déterminer quels éléments de l'environnement et quelles caractéristiques personnelles sont impliqués dans les capacités de déplacement.

Comment va se dérouler la recherche ?

La recherche se déroulera en une seule séance d'une durée de 1 heure 15 minutes environ.

Vous allez être positionné assis face à un ordinateur où vont figurer des environnements virtuels qui représentent des trajets. Un appareil d'analyse du mouvement des yeux sera positionné sur l'ordinateur, pour pouvoir mesurer la manière dont vous regardez l'environnement. Cet appareil est non invasif et n'altère pas le fonctionnement du corps.

L'expérience se déroulera en plusieurs phases :

- **Phase 1 : la mesure des capacités d'induction/déduction** : plusieurs images vont vous être présentées. Il vous sera demandé de déduire l'image la mieux appropriée à la situation.
- **Phase 2 : la calibration** : vous serez amené à suivre du regard des points se déplaçant sur l'écran. Cette phase a pour objectif de paramétrer le matériel.
- **Phase 3 : l'apprentissage d'itinéraire** : une vidéo d'itinéraire à apprendre vous sera présentée. À la suite de celle-ci, vous serez amené à retrouver le trajet correct en vous aidant des touches du clavier pour donner vos réponses. Vous serez amené à faire cet exercice pour plusieurs trajets.
- **Phase 4 : questionnaire des déplacements et d'usage des jeux vidéo** : Vous serez amenés à répondre à un court questionnaire pour connaître vos déplacements au quotidien ainsi que votre usage des jeux vidéo.

Que se passera-t-il à la fin de ma participation à cette recherche ?

À la fin de la recherche, un temps sera pris avec vous si vous avez des questions ou remarques sur l'étude. De même, vous pourrez si vous le souhaitez, recevoir une lettre d'information par e-mail reprenant les résultats principaux de la recherche à laquelle vous avez participé ainsi que leurs implications dans le domaine de la recherche et de la prise en charge.

Quels sont les bénéfices attendus de ma participation à l'étude ?

Votre participation à cette étude pourra contribuer à l'accroissement des connaissances que nous possédons sur les difficultés de déplacements rencontrées par les personnes présentant une déficience intellectuelle. De même, cette recherche pourra grâce aux résultats inspirer la conception de systèmes d'aide à la navigation (GPS) pour piétons.

Ma participation à l'étude comporte-t-elle des risques et/ou des contraintes particulières ?

Votre participation à cette étude n'entraînera pas de participation financière de votre part. Mis à part le temps passé pendant l'expérimentation, vous ne serez pas sollicité pour d'autres raisons.

Le matériel d'oculométrie utilisé appartient à la société Tobii (leader mondial de l'analyse oculaire) qui produit du matériel de haute technologie destiné à la recherche scientifique. L'ensemble du matériel proposé par cette société a été testé et approuvé par des laboratoires certifiés conformément à la norme

européenne CEI/EN 62471. Si vous souhaitez plus d'informations sur le matériel vous pouvez consulter la page <https://help.tobii.com/hc/en-us/articles/212372449-Safety-guidelines>.

Quels sont mes droits en tant que participant à la recherche ?

Vous êtes totalement libre d'accepter ou de refuser de participer à cette étude sans avoir à vous justifier et sans conséquence pour vous.

Vous disposez du temps que vous estimez nécessaire pour prendre la décision de participer à l'étude.

En cas d'acceptation, vous pourrez à tout moment revenir sur votre décision, sans nous en préciser la raison par simple mail au Responsable scientifique de la Recherche.

Dans le cadre de cette étude, un traitement de vos données personnelles sera mis en œuvre.

Conformément aux articles *15 et suivants* du règlement général sur la protection des données, vous disposerez des droits suivants :

- **Accès** : droit d'obtenir la communication de vos données personnelles en notre possession
- **Information** : droit d'obtenir des informations sur le traitement en particulier, ses finalités, les catégories de données traitées, leur source, le nom du responsable du traitement et du délégué à la protection des données, les destinataires ou catégories de destinataires des données, le transfert hors Union européenne, vos droits d'accès, de rectification, d'effacement, de limitation du traitement, ainsi que du droit de s'opposer au traitement et du droit à la portabilité des données, droit de retirer votre consentement à tout moment, droit d'introduire une réclamation auprès d'une autorité de contrôle
- **Rectification** : droit de demander la rectification des données personnelles inexacts ou incomplètes
- **Effacement** : droit de demander l'effacement des informations déjà collectées (sauf si la procédure prévoyait un procédé d'anonymisation et que ce procédé a été exécuté au préalable de cette demande)
- **Limitation du traitement** : droit de demander la limitation du traitement ; les données pourront être conservées, mais ne seront traitées qu'avec votre consentement
- **Portabilité des données** : le droit de recevoir les données que vous avez fournies et de les transmettre à un autre responsable du traitement, ou de demander que les données soient transmises directement d'un responsable du traitement à un autre

Vous pourrez exercer ces droits liés au traitement de vos données personnelles en vous adressant au **Responsable scientifique de la recherche** à l'initiative de cette étude.

Comment sont gérées vos données personnelles ?

Le responsable du traitement est l'Université de Lille. Le traitement est fondé sur l'article 6.1 du Règlement Général sur la Protection des Données, les bases légales sont votre consentement et l'exécution d'une mission d'intérêt public.

Dans le cadre de cette étude, un traitement de vos données personnelles sera mis en œuvre pour permettre d'analyser les résultats. Ces données seront identifiées par un numéro de code.

Ces données sont susceptibles d'être utilisées dans le cadre de l'étude et d'être traitées par le responsable scientifique ou les personnes placées sous son autorité et astreintes à une obligation de confidentialité.

L'ensemble des données recueillies pendant l'expérimentation seront anonymisées par un système de code grâce à un fichier de correspondance.

Les données personnelles (nom, prénom, formulaire de consentement) seront conservées pendant la durée de l'étude jusqu'à la publication des résultats de l'étude dans le système d'information de l'organisme responsable de la recherche, puis seront archivées pendant 10 ans à l'issue de l'étude. Les responsables scientifiques pourront accéder à ces données à des fins de recherche scientifiques ultérieures pour une finalité compatible avec l'objectif de l'étude uniquement : vous recevrez préalablement les informations sur ce traitement qui fera l'objet des formalités réglementaires applicables.

À qui dois-je m'adresser en cas de questions ou de problèmes ?

Vous pouvez poser toutes les questions que vous souhaitez, avant, pendant et après l'étude en vous adressant à Alexandra STRUYF par mail : alexandra.struyf@univ-lille.fr

Si vous n'obtenez pas de réponses à vos questions dans un délai d'un mois, vous pouvez porter réclamation auprès de la CNIL.

L'ensemble de l'équipe de recherche vous remercie d'avance pour l'intérêt que vous porterez à cette étude.

COURBOIS Yannick

STRUYF Alexandra

Professeur des universités

Doctorante



Annexe 12b. Présentation de la recherche en langage simplifié (étude 3)



Présentation du travail de recherche
pour l'étude sur :
Les déplacements en environnements virtuels

On vous propose de **participer** à
une **recherche**
sur les **déplacements**



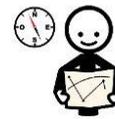
La recherche est faite
avec l'**université de Lille**
avec le **professeur Yannick Courbois**



La recherche étudie
le **déplacement des personnes**
sur un **ordinateur**



Le but de la recherche est
d'**aider les personnes**
avec des **difficultés à s'orienter**



Pendant la recherche **vous allez**

1. vous déplacer sur un **ordinateur**



2. faire des **exercices avec des images**



3. répondre à des **questions**



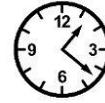
La recherche va se faire en **2 fois**

Une première fois pendant

1 heure

Une deuxième fois pendant

45 minutes



Votre nom n'apparaîtra pas dans la recherche



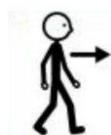
La recherche **respecte les lois** sur la **protection des personnes**



Vous avez **le droit** de dire **oui ou non** pour participer



Vous avez le droit d'**arrêter la recherche quand vous voulez** et **sans conséquences**



Vous ne recevrez **pas d'argent** pour **participer à l'étude**



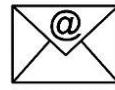
Les résultats de la recherche seront publiés **sur internet**



Après l'étude vous pourrez **voir les résultats** et demander une **explication**



Si vous avez **des questions**
vous pouvez envoyer **un mail** à
alexandra.struyf@univ-lille.fr



Annexe 13a. Formulaire de consentement à la recherche (étude 3)



**Formulaire de consentement de participation à
une recherche intitulée :
Etude de la prise d'informations visuelles lors des déplacements en environnements
virtuels**

Organisme responsable de l'étude :

Université de Lille
Laboratoire PSITEC
59650 Villeneuve-d'Ascq
tél : 03 20 41 63 47

Investigateur principal :

Alexandra STRUYF
Université de Lille
Doctorante au laboratoire PSITEC
Mail : alexandra.struyf@univ-lille.fr

Responsable scientifique de la recherche

Pr Yannick COURBOIS
Université de Lille – Laboratoire PSITEC
59650 Villeneuve-d'Ascq
Tél.: 03 20 41 63 77
Mail : yannick.courbois@univ-lille.fr

Mail de Jean-Luc Tessier délégué à la protection des données : jean-luc.tessier@univ-lille.fr

Je soussigné-e Mme, M. (barrer la mention inutile), accepte librement et volontairement de participer à la recherche intitulée : **Étude de l'apprentissage d'itinéraires en environnements virtuels par une approche oculométrique** dont le Professeur Yannick COURBOIS est responsable et qui m'a été proposée par Alexandra Struyf (alexandra.struyf@univ-lille.fr).

Étant entendu que :

- L'investigateur qui m'a informé(e) et a répondu à toutes mes questions m'a précisé que ma participation à cette étude est libre et que je peux arrêter d'y participer à tout moment en l'informant préalablement.
- J'ai été clairement informé(e) des éléments suivants : But de la recherche – Méthodologie – Durée de ma participation – Bénéfices attendus – Contraintes – Risques prévisibles ; j'ai pris connaissance de la note d'information m'expliquant cette étude.
- Si je le souhaite, je serai informé(e) par le responsable scientifique des résultats globaux de cette recherche selon les modalités figurant dans la note d'information qui m'a été remise.
- Mon consentement ne décharge en rien le responsable scientifique et l'organisme responsable de la recherche de l'ensemble de leurs responsabilités et je conserve tous mes droits garantis par la loi.
- L'investigateur et/ou moi-même pourrons être contactés ou recontactés afin de compléter les éventuelles données manquantes des questionnaires.
- J'accepte que les données enregistrées à l'occasion de cette recherche puissent faire l'objet d'un traitement informatisé par l'organisme responsable de la recherche. Les données recueillies demeureront strictement confidentielles. J'ai bien noté que le droit d'accès prévu par règlement général sur la protection des données s'exerce à tout moment auprès de l'investigateur qui me suit dans le

cadre de la recherche et qui connaît mon identité. Je pourrai exercer mon droit de rectification et d'opposition, d'effacement, de limitation et de portabilité auprès de ce même investigateur, qui contactera l'organisme responsable de la recherche pour faire valoir mes droits.

Fait à le.....

Fait à le.....

Signature du/de la **participant(e)**
accompagnée de la mention « lu et approuvé »,

Signature de l'**investigateur/trice**,

Le présent formulaire est réalisé en deux exemplaires, dont un est remis à l'intéressé, ou à son représentant légal (pour les majeurs sous tutelle ou sous curatelle). Un exemplaire sera conservé par l'investigateur ; en toute confidentialité, conformément à la loi.

**Annexe 13b. Formulaire de consentement à la recherche en langage simplifié
(étude 3)**



Formulaire de **consentement libre et éclairé**
pour l'étude sur :

Les déplacements en environnements virtuels

On m'a proposé de **participer** à
une **recherche**
sur les **déplacements**



On m'a donné
un document
qui **explique** l'étude



On a **lu le document** avec moi
et on me l'a **expliqué**



On m'a raconté
comment va se passer l'étude



J'ai compris
à quoi va servir l'étude



On m'a dit que
mon nom n'apparaîtra pas dans la recherche



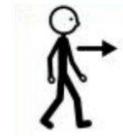
On m'a expliqué que
la recherche **respecte la loi**
sur le **respect des personnes**



J'ai compris que
je ne suis pas obligé de participer



J'ai compris que
j'ai le droit d'arrêter la recherche
quand je veux
et **sans conséquences**



Je sais que
je ne vais pas recevoir d'**argent**
pour avoir participé



On m'a expliqué que
les résultats peuvent être **sur internet**



On a **répondu à mes questions**



Je sais que
je pourrai **voir les résultats**
et demander que l'on **m'explique**



Je soussigné,

Prénom : Nom :



Accepte de participer



N'accepte pas de participer

A la recherche sur les déplacements

organisée par Alexandra Struyf

sous la direction de

Yannick Courbois

Date :/...../20....

Recopier la phrase « Lu et approuvé »

.....

Et signer dans le carré



Fait à le.....

Signature de l'investigateur/trice

Annexe 14. Consignes de passation (étude 3)

I. Explication de la tâche à venir

L'objectif de l'étude est d'étudier les mouvements des yeux pendant l'apprentissage d'un chemin.

Pour ce faire, vous allez effectuer une tâche sous forme de jeu, où vous allez devoir apprendre des itinéraires puis les restituer.

II. Calibration de l'oculomètre

Installez-vous dans une position confortable, où vous avez un accès facile aux flèches directionnelles du clavier. Pendant le jeu, vous devrez bouger le moins possible et rester dans cette même position.

Dans un premier temps, nous allons d'abord faire un calibrage du matériel oculométrique, pour que l'appareil enregistre bien les mouvements des yeux.

Des points vont apparaître à l'écran, il faudra les suivre du regard.

III. Explication du jeu

Une fois cette phase effectuée, nous enchaînerons directement avec le jeu.

L'objectif du jeu est de retrouver les bonnes directions aux différentes intersections. Une vidéo du chemin correct va vous être montrée, puis vous allez devoir le refaire dans le désordre. Pendant la phase de réponse, une croix apparaîtra à l'écran, il faudra attendre qu'elle disparaisse pour répondre.

Pour indiquer votre réponse, vous utiliserez les flèches du clavier. Si vous souhaitez tourner à droite, vous appuyer sur la flèche de droite du clavier ; si vous voulez tourner à gauche, vous appuyer sur la flèche de gauche ; si vous voulez aller tout droit, vous appuyer sur la flèche du haut.

Lorsque vous donnez votre réponse, si elle est correcte, une coche verte apparaît. Si votre réponse est fautive, une croix rouge apparaît.

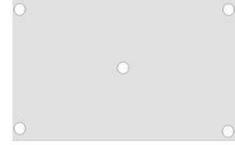
Pour gagner et passer à l'itinéraire suivant, il faut réussir à faire le chemin correct 2 fois de suite. Vous avez 5 essais pour réussir. En tout, il y aura 6 chemins à mémoriser.

Est-ce que vous avez des questions ?

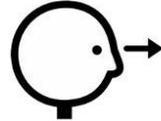
Annexe 15. Consignes de passation simplifiées (étude 3)

Phase de calibration :

Des points vont être affichés sur l'écran.



Tu dois suivre avec tes yeux les points.



Apprentissage des chemins :

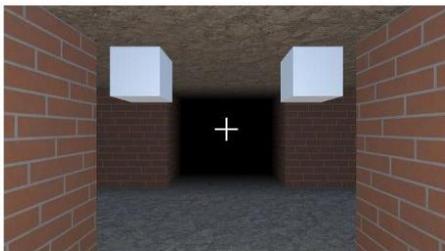
On va faire un jeu.

Tu vas voir une vidéo d'un chemin.

Après, tu vas refaire le même chemin dans le désordre.

Une photo avec une croix va s'afficher,

tu devras répondre quand la croix disparaît.



Tu dois appuyer sur les flèches du clavier pour répondre.

[Montrer sur les touches du clavier]



Pour tourner à droite,
appuies sur la flèche de droite.



Pour tourner à gauche,
appuies sur la flèche de gauche.



Pour aller tout droit,
appuies sur la flèche du haut.



Quand tu donnes la bonne réponse,
un signe vert apparait.



Quand tu donnes la mauvaise réponse,
une croix rouge apparait.



Pour gagner,
il faut faire le chemin sans erreurs
2 fois de suite.



Tu as 5 essais pour gagner.

