



HAL
open science

Paradigme de Posner du laboratoire au monde réel : orientation de l'attention en espace avant et arrière

Rébaï Soret

► **To cite this version:**

Rébaï Soret. Paradigme de Posner du laboratoire au monde réel : orientation de l'attention en espace avant et arrière. Neurosciences. Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2021. Français. NNT: . tel-04669306

HAL Id: tel-04669306

<https://enac.hal.science/tel-04669306>

Submitted on 8 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

Présentée et soutenue par :

Rébaï SORET

le vendredi 19 novembre 2021

Titre :

Paradigme de Posner du laboratoire au monde réel :
orientation de l'attention en espace avant et arrière

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED AA : Neurosciences, comportement et cognition

Unité de recherche :

ENAC-LAB - Laboratoire de Recherche ENAC

Directeur(s) de Thèse :

M. Christophe HURTER (directeur de thèse)

M. Vsevolod PEYSAKHOVICH (co-directeur de thèse)

Jury :

M. Jean-Pierre JESSEL Professeur Université de Toulouse 3 - Président

M. Jean-Michel BOUCHEIX Professeur Université Bourgogne Franche-Comté - Rapporteur

M. Jean-Pierre BRESCIANI Professeur Université de Fribourg Suisse - Examineur

Mme Pom CHARRAS Maître de conférences Université Paul-Valéry Montpellier 3 - Examinatrice

M. Maxime CORDEIL Docteur Université Monash Australie - Examineur

M. Christophe HURTER Professeur ENAC - Directeur de thèse

Mme Anne-Hélène OLIVIER Maître de conférences Université de Rennes 2 - Rapporteur

M. Vsevolod PEYSAKHOVICH Ingénieur de recherche ISAE-SUPAERO - Co-directeur de thèse

Résumé

Cette thèse multidisciplinaire aux frontières des sciences cognitives et des sciences de l'ingénieur, étudie la validité écologique du paradigme de Posner et les facteurs qui influencent la préparation du traitement de l'information visuospatiale. En effet, ce paradigme, qui est le plus utilisé pour étudier empiriquement nos capacités d'orientation attentionnelles, n'a pas encore franchi les portes du laboratoire. Nous ignorons donc aujourd'hui encore, comment optimiser la sélection d'informations en orientant l'attention des individus à l'aide d'indice perceptif (flash lumineux, bip sonore, par exemple) dans des environnements complexes et écologiques tels que peuvent l'être les cockpits d'avions, les tours de contrôle aériennes, les stations spatiales ou les blocs opératoires.

Nous avons utilisé de nouvelles technologies telles que la réalité virtuelle (RV) et la réalité augmentée en remplacement de l'écran d'ordinateur standard habituellement utilisé pour administrer le paradigme de Posner. La réalité virtuelle nous a tout d'abord permis de tester ce paradigme dans un environnement immersif lorsque des actions concrètes doivent être réalisées par les individus. Dans cette première étude, les participants devaient récupérer le plus rapidement possible des ingrédients situés devant eux. Les résultats montrent des effets similaires au paradigme classique ce qui suggère sa transférabilité en environnement immersif et écologique. Une deuxième étude en réalité augmentée projetée a permis de confirmer ces résultats dans un environnement qui gagne encore en validité écologique.

La vision à 360° de la RV nous a permis de prendre en compte un espace perceptif jusqu'alors délaissé dans les études sur le paradigme de Posner : l'espace situé derrière nous. En effet, dans de nombreuses situations du quotidien, l'information que nous devons prioriser se situe au-delà de l'espace frontal. Quelle méthode utiliser alors pour guider efficacement les individus dans ce genre de situation ? Pour répondre à cette question, nous avons testé plusieurs versions modifiées du paradigme de Posner en RV. Ces expériences ont mis en évidence que des informations perçues par réflexion (miroir) entraînaient des temps de réaction différents par rapport à une même information perçue à travers une vitre. Il existerait donc une différence de traitement cognitive des informations perçues devant nous, selon qu'elle existe en réalité derrière ou devant nous. Utiliser des informations par réflexion pourrait donc permettre d'orienter l'attention en arrière. Une dernière expérience se propose de valider ce nouveau paradigme d'étude d'orientation attentionnel dans l'espace arrière en condition réelle. Cette expérience consiste en une tâche de Posner classique en laboratoire à laquelle ont été ajoutés des écrans tout autour du sujet associé à l'écran principal pour étudier ces effets d'information réflexive (effet miroir).

La totalité des expériences de cette thèse a permis de déterminer une partie des facteurs qui impactent notre capacité à diriger notre attention dans l'espace (modalité perceptive, type d'indice, etc.). Nous avons pu démontrer la robustesse du paradigme de Posner dans des environnements écologiques et interactifs. C'est donc un outil de choix pour déterminer les caractéristiques des indices à utiliser pour optimiser les déplacements attentionnels dans ce type d'environnements. De plus, nous avons pu étendre son champ d'action en y intégrant l'espace situé en dehors de la vision frontale. Il est ainsi possible d'imaginer de nombreux outils de guidage fiable à moindre coût : en intégrant des projecteurs dans les stations spatiales ou les tours de contrôle aériennes ; en ajoutant des informations miroirs ou en utilisant des miroirs déjà présents, comme dans le cadre de vol en formation ; ou encore en

optimisant les programmes de formation en réalité virtuelle ou augmentée pour entrainer les pilotes et les chirurgiens.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Sciences cognitives et sciences de l'ingénieur	1
1.2	Attention	6
1.2.1	Définition	8
1.2.2	Attention Sélective	12
1.2.3	Orientation de l'attention	15
1.2.3.1	Le paradigme de Posner	18
1.2.3.2	L'orientation exogène et endogène	20
1.2.3.3	L'orientation ouverte et couverte	31
1.2.4	Le guidage de l'attention	34
1.2.5	En résumé	42
1.3	La Réalité virtuelle	44
1.3.1	Les technologies de réalité virtuelle	48
1.3.2	Sciences cognitives et réalité virtuelle	51
1.3.2.1	Un environnement transformé	53
1.3.2.2	Un champ perceptif étendu	55
1.3.3	Un outil de recherche et de formation	59
1.3.4	Guidage de l'attention en réalité virtuelle	61

2	Le paradigme de Posner en environnement écologique	65
2.1	Introduction générale du chapitre	65
2.2	Paradigme de Posner en réalité virtuelle	69
2.2.1	Introduction	69
2.2.2	Méthode	71
2.2.3	Résultats	77
2.2.4	Conclusion et discussion	84
2.3	Paradigme de Posner en réalité augmentée projetée	94
2.3.1	Introduction	94
2.3.2	Méthode	95
2.3.3	Résultats	98
2.3.4	Conclusion	98
2.4	"The Posner Game"	102
2.4.1	Introduction	102
2.4.2	Méthode et Procédure	104
2.5	Conclusion générale du Chapitre	107
3	Le paradigme de Posner à 360°	111
3.1	Introduction générale	111
3.2	Paradigme de Posner à 360° en réalité virtuelle	115
3.2.1	Introduction	115
3.2.2	Attention à la Navette	117
3.2.2.1	Méthode	117
3.2.2.2	Résultats	122
3.2.2.3	Conclusion	125

3.2.3	Attention au débris	127
3.2.3.1	Méthode	127
3.2.3.2	Résultats	132
3.2.3.3	Conclusion	135
3.2.4	Discussion Générale	142
3.3	Information réflexive dans un paradigme de Posner	144
3.3.1	Introduction	144
3.3.2	Méthode	146
3.3.3	Résultats	152
3.3.4	Conclusion	153
3.3.5	Discussion	158
3.4	Paradigme de Posner à 360°, un nouveau paradigme expérimental ?	159
3.4.1	Introduction	159
3.4.2	Méthode	161
3.4.3	Plan d'analyse	167
3.5	Conclusion générale du chapitre	171
4	Perspective Applicative	175
4.1	Synthèse globale des expériences réalisées	178
4.1.1	Expériences réalisées et facteurs manipulés	178
4.1.2	Paramètres utilisés	182
4.1.3	Synthèse des résultats	184
4.2	Ouverture et Application	184
4.2.1	Applications pour les systèmes d'alarme	186
4.2.2	Applications pour le guidage de l'attention et l'apprentissage	191
4.2.3	Applications en clinique et évaluation neuropsychologique	197

4.3 Conclusion	200
Références bibliographiques	203

1 Introduction

Dans cette thèse, nous proposons une approche multidisciplinaire dans l'étude des processus d'orientation de l'attention en environnement immersif, écologique, et à 360°. En utilisant des versions modifiées du paradigme de Posner, nous avons utilisé différents indices visuels et auditifs afin d'améliorer le traitement d'une information vers une certaine région de l'espace visuelle. Ce paradigme permet non seulement de déterminer l'efficacité d'une stimulation à orienter l'attention, mais également d'identifier les facteurs qui affectent ces processus d'orientation. Cette thèse a donc mobilisé des connaissances et méthodes de différents champs de recherche tels que : les sciences cognitives et les sciences de l'ingénieur. Afin de mieux comprendre ce qui relie et sépare ces deux sciences. Nous commencerons par une présentation rapide de ces deux sciences, de leurs objectifs et de leurs approches respectives.

1.1 Sciences cognitives et sciences de l'ingénieur

Les sciences cognitives sont un regroupement de plusieurs disciplines (figure 1.1) réuni dans un objectif commun : la description, l'explication et la simulation des mécanismes de la pensée humaine, animale ou artificielle. De manière générale, les sciences cognitives s'intéressent tout système complexe de traitement de l'information capable d'acquérir, conserver, utiliser et transmettre des connaissances. Dans cette thèse, c'est plus particulièrement

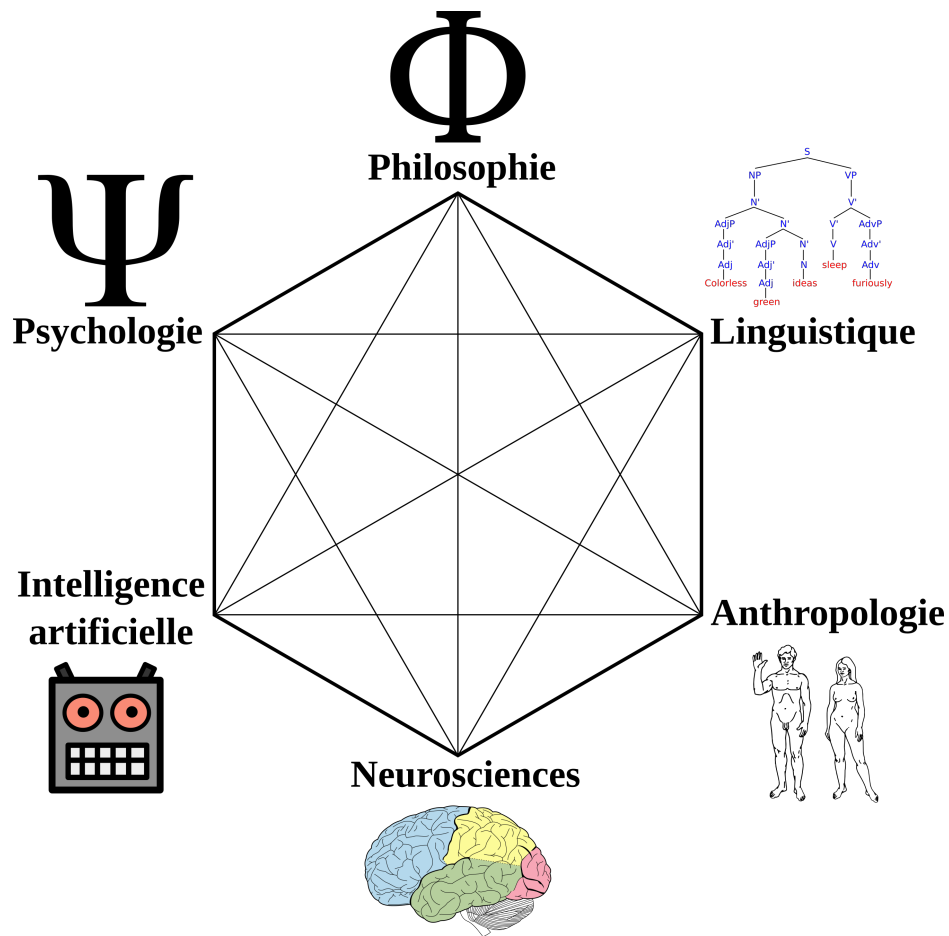


Figure 1.1. Sciences cognitives

les connaissances acquises en psychologie cognitive et neurosciences qui nous intéresserons. La psychologie cognitive a pour objectif de fournir une description de la cognition ou du fonctionnement cognitif (mécanisme perceptif, attentionnel, mnésique, émotionnel, moteur, langagier, en lien avec le raisonnement, la résolution de problème, etc.). Il s'agit d'étudier, chez l'homme ou l'animal, les mécanismes et les structures permettant l'acquisition de connaissances (au sens large) à partir de l'environnement, mais également, le stockage de ces connaissances, la récupération, la transformation et l'utilisation de ces connaissances

dans des activités très diverses dites cognitives. Ceci afin de proposer des explications à l'élaboration des comportements (par exemple, en modélisant des processus). Dans cet objectif de recherche fondamentale, l'expérimentation et les mesures comportementales (temps de réaction, temps de réalisation d'une tâche, etc.), oculométriques (mouvements des yeux) ou neuro-physiologiques (imagerie fonctionnelle, potentiel évoqué, etc.) sont utilisées préférentiellement. Dans cette thèse, nous nous intéresserons principalement au processus de traitement de l'information visuospatiale, c'est-à-dire les processus responsables du traitement de l'information visuelle et de leur organisation dans l'espace (l'environnement visuel).

Les sciences de l'ingénieur, quant à elles, sont moins axées sur de la recherche fondamentale que sur la réalisation de produits répondant à certains besoins. Il s'agit d'améliorer des systèmes existants et d'en inventer de nouveaux en se basant sur les théories issues de sciences plus fondamentales comme la physique, les mathématiques ou encore, la psychologie cognitive. Les sciences de l'ingénieur font appel à de nombreuses disciplines telles que la robotique, l'informatique ou l'électronique dans cet objectif. Pour donner un exemple, dans cette thèse, nous nous intéresserons à la conception de système de guidage de l'attention et d'alarme efficiente pour améliorer la sécurité dans des domaines tels que l'aéronautique, le spatial ou le médical.

Ces deux sciences qui peuvent sembler si différentes, ne sont pourtant pas sans liens. Elles ont même un passé commun. En effet, c'est avec l'émergence des sciences de l'ingénieur que naît la théorie de l'information — prisme par lequel la psychologie cognitive conceptualise la cognition humaine et par lequel les ingénieurs pensent leur machine, notamment en intelligence artificielle. Les nouvelles technologies ont aussi fourni un support de choix pour étudier comment nous traitons l'information que nous recevons, notamment en fournissant aux chercheurs des outils de mesure précis des temps de réaction, mais également un contrôle

rigoureux des informations fournies au participant. Ainsi, de nombreuses découvertes ont pu être faites et les grandes fonctions cognitives ont pu être conceptualisées. Les sciences de l'ingénieur ont également pu apprendre de la psychologie cognitive en se basant sur les découvertes effectuées sur la façon dont l'homme traite l'information qu'il reçoit afin d'améliorer leur système.

Ce dialogue, qui est au fondement même des sciences cognitives, s'est malheureusement tari avec les années. Et nous constatons dans de nombreux domaines l'absence regrettable de références aux théories de l'information issues des sciences de la cognition dans les études effectuées en sciences de l'ingénieur. Ceci est particulièrement flagrant dans les études effectuées sur l'attention (voir section 1.2.4). Ce constat se perçoit également dans le domaine de la conception d'environnements virtuels (EV), un domaine éminemment multidisciplinaire. Burkhardt (2003a) diront à ce propos que :

La recherche technologique est aujourd'hui plus avancée que l'étude des aspects cognitifs. Hormis quelques thématiques suivies en psychologie et en ergonomie (mal des simulateurs, pointage et localisation spatiale, navigation dans l'espace, etc.), les travaux sont souvent la description de solutions sans réelle validation empirique. Lorsqu'elles existent, les évaluations avec des utilisateurs s'appuient majoritairement sur une psychologie naïve, et souffrent par conséquent d'un manque de fondement théorique, d'une valeur écologique faible, et de l'absence de réplique. D'un autre côté, les psychologues et les ergonomes connaissent mal les concepts formels ou pragmatiques structurant historiquement ce champ, de même que les propriétés et les limites des technologies associées aux EV, sous-estimant ou parfois surestimant leur valeur potentielle. Il y a là une opportunité de recherche et de collaboration pour toutes ces disciplines.

Nous espérons modestement que cette thèse contribuera à renouer ce dialogue en montrant

l'intérêt et la portée d'une multidisciplinarité dans l'exploration d'un processus aussi fondamental que constitue l'orientation de l'attention et des apports que cela peut apporter dans la conception de système de guidage attentionnelle.

Dans cette thèse, des connaissances en sciences cognitives et en sciences de l'ingénieur ont été mobilisées afin de concevoir des protocoles expérimentaux innovant en utilisant des technologies émergentes telles que la réalité virtuelle et la réalité augmentée projetée. L'alliance de deux sciences, l'une fondamentale, l'autre plus appliquée qui fonctionne avec des méthodes et des objectifs différents, oblige à faire des compromis et à penser la recherche d'une manière nouvelle, multidisciplinaire. Cette nouvelle approche apporte une perspective intéressante dans l'étude du guidage de l'attention en comblant les lacunes des recherches qui ont pu être effectuées en sciences de l'ingénieur en apportant des connaissances théoriques issues des sciences de la cognition. Ces connaissances théoriques sont trop souvent ignorées ou mal comprises dans les études effectuées en sciences de l'ingénieur. Cette nouvelle approche nous donne également l'occasion de repenser les processus d'orientation de l'attention et les paradigmes utilisés en sciences cognitives pour les mesurer, grâce aux perspectives qu'offrent les nouvelles technologies telles que la réalité virtuelle.

Dans cette introduction théorique, nous commencerons tout d'abord par une conceptualisation de l'attention et sa formalisation d'un point de vue des sciences cognitives et du traitement de l'information. Nous mettrons ces théories en liens avec les technologies de guidage de l'attention effectuées en recherche appliquée. Nous continuerons par une présentation de la réalité virtuelle, de ces limites et avantages, et des nouvelles questions de recherche qu'elles soulèvent dans le domaine de l'orientation de l'attention.

1.2 Attention

L'attention est un terme fréquemment employé dans le langage courant. Elle est de ce fait, une des composantes cognitives les plus connues des non-spécialistes. Tout le monde peut se faire une idée de ce qu'est l'attention. C'est un mot que l'on rencontre régulièrement sur les routes : « attention travaux », « attention chaussée glissante » ou dans sa plus simple expression: « ! ». De manière générale, les panneaux de signalisation ont pour objectif d'avertir les conducteurs en fournissant des informations relatives à l'usage de la route. Ils préviennent d'éventuels dangers que les usagers peuvent rencontrer, facilitent la circulation en indiquant les directions à suivre et les endroits où il faut s'arrêter et rappellent diverses prescriptions particulières de police. L'ignorance, l'oubli ou le mépris de ces informations relatif à l'usage de la route peut engendrer de graves conséquences. Il est donc important de les considérer et d'adapter sa conduite, en bref, d'y prêter attention !

L'attention, c'est aussi ce qui nous fait trop souvent défaut. Combien de catastrophes, combien d'accidents peuvent être imputés à un manque d'attention ou une surcharge attentionnelle ? Les technologies de plus en plus complexes et sophistiquées qui peuplent notre quotidien ne nous facilitent pas la tâche. Du bureau à la salle de classe en passant par la maison, les technologies sont partout. Ces dernières tiraillent notre attention et nous font bondir d'une information à une autre en permanence. Elles le font si bien qu'il est aujourd'hui de plus en plus difficile de rester concentrer très longtemps sur une même information (Lachaux, 2011). Les professeurs et enseignants ne le savent que trop bien. Combien de fois se sont-ils plaints du manque d'attention de leurs élèves et de la difficulté d'enseigner devant des classes « endormies » ? De nombreuses études, montrent que les nouvelles générations, que l'on appelle vulgairement « *Digital Native* » et qui grandissent avec les technologies d'internet et du numérique, sont habituées à traiter l'information de manière superficielle par des déplacements rapides de l'attention et une réduction du temps

consacré à une même tâche (Carr, 2011). Le développement du multitâche, par rapport aux générations précédentes, serait lié à une plus grande distractivité et de plus faibles capacités de contrôle cognitif (vulgairement, notre capacité à résister à la distraction). Il est donc aujourd'hui, plus important que jamais, de comprendre son fonctionnement, en étudiant ses limites et ses faiblesses, mais aussi, ses forces.

S'il est un domaine où l'attention à une importance capitale, c'est bien celui de l'aéronautique. Les pilotes et les contrôleurs aériens, par exemple, peuvent être confrontés à un flot d'informations très important et des défauts d'attention peuvent malheureusement être à l'origine d'erreur de "jugement" et provoquer de nombreuses pertes humaines. En effet, contrairement aux idées reçues, les accidents aériens sont rarement dûs à des problèmes techniques, mais bien à une erreur humaine, dans environ 70% à 80% des cas (Lenné, Ashby, & Fitzharris, 2008; Shappell & Wiegmann, 2001; Wiegmann & Shappell, 2001. En d'autres termes, le pilote a pu procéder à une manœuvre qu'il ne devait pas effectuer, ou il n'a pas agi comme il aurait dû. Cela semble avoir été le cas, par exemple, pour la catastrophe du Boeing 737 d'Helios, le 14 août 2005, en Grèce. C'est en 1979, durant un symposium historique à San Francisco, deux ans après l'accident du Boeing 747 de la compagnie hollandaise KLM en 1977 qui a décollé sans autorisation et qui a percuté un autre Boeing, que des experts de différents domaines se sont regroupés afin d'étudier les facteurs qui conduisent à des erreurs humaines. Le monde de l'aviation s'ouvre alors à des chercheurs d'un nouveau type. Les spécialistes du "facteur humain", qui deviennent des analystes indispensables. "Cette nouvelle science est devenue essentielle quand les machines sont devenues tellement complexes que l'homme n'a plus vraiment été capable de les gérer correctement", disait Erik Hollnagel, spécialiste en facteur humain (Hollnagel, 2010. Il a alors été nécessaire de comprendre le comportement humain dans l'avion et les limites de notre système cognitif pour ne plus commettre les erreurs du passé.

Si les nombreux instruments de bord et les nombreux systèmes de contrôle qui composent l'environnement des pilotes et contrôleurs aériens sont autant d'outils et d'instruments destinés à améliorer la sécurité des pilotes et de leurs passagers, ils sont inutiles si l'on ne tient pas compte de leurs utilisateurs et de la façon dont ils les perçoivent et les utilisent. À quoi sert une alarme si on ne l'entend pas ? C'est le malheureux constat que nous démontrent les phénomènes de tunnélisation (voir section 1.2.3.2). Ils nous arrivent parfois d'être aveugle aux informations les plus saillantes et de ne pas nous rendre compte du retentissement d'une alarme. Nous sommes même bien plus aveugles que nous le pensons sur notre capacité à percevoir le monde. Les phénomènes de cécité attentionnelle (voir section 1.2.1) nous rappellent combien notre vision consciente du monde est un agrégat d'informations récupérées de notre environnement, tributaire de notre attention, et qui ne constitue qu'une petite partie de ce que nous percevons. Il est donc important de nous interroger sur la manière dont nous concevons nos technologies et la manière dont on les utilise. Notamment dans le domaine de la sécurité aérienne où manquer une information capitale peut-avoir de graves conséquences. L'étude des processus attentionnels peut nous aider à mieux concevoir ces technologies et à concevoir des environnements plus ergonomiques. Mais, voyons tout d'abord ce que signifie vraiment ce terme, que l'on utilise si souvent et qui semble désigner tant de choses.

1.2.1 Définition

La plupart des chercheurs qui travaillent sur l'attention s'accorderont à dire qu'elle est nécessaire dans toutes nos activités quotidiennes. Elle est un facteur de l'efficacité cognitive qu'il s'agisse de percevoir, mémoriser ou résoudre des problèmes. Elle est également, selon Stanislas Dehaene, un des 4 piliers de l'apprentissage avec l'engagement actif, le retour d'information (*feedback*) et la consolidation (Dehaene, 2013). L'attention module

massivement l'activité cérébrale et impacte directement la vitesse et la facilité d'apprentissage. Plusieurs études ont déjà montré, par exemple, que guider l'attention d'une personne avait une influence sur l'insight, c'est-à-dire, la découverte soudaine de la solution à un problème sans passer par une série d'essais-erreurs progressifs (Grant & Spivey, 2003; Thomas & Lleras, 2007). L'attention joue un rôle central parmi les mécanismes de traitement de l'information.

De nombreuses définitions de l'attention ont été proposées au fil du temps. Une définition précise et univoque de l'attention semble donc difficile à trouver. Définir une théorie générale sur l'attention ou en donner une définition simple est difficile (Zanto & Gazzaley, 2014). Cependant, Picton, Stuss, and Marshall (1986) ont déterminé trois grandes catégories de définition, selon qu'elles présentent ce phénomène comme « un processus de sélection et d'inhibition de certaines informations », « une ressource attribuée à des processus mentaux qui facilitent la sélection d'information » ou « un état d'esprit dans lequel nous nous plaçons pour recevoir de l'information à gérer ».

Malgré tous ces angles d'approche, certains critères semblent incontournables pour la décrire (d'après l'analyse de Poissant, Falardeau, & Poëllhuber, 1993) : elle est toujours orientée en fonction de nos buts et de nos besoins ; elle est limitée en durée et en quantité, elle sélectionne les informations pour une courte période de temps (Grabe, 1986; Simon, 1986) et elle restreint l'information disponible en garantissant que seulement une petite partie de celle-ci sera utilisée pour des comportements ultérieurs. Sans cette restriction, le système cognitif serait envahi d'informations et le comportement irait dans tous les sens (Simon, 1986). L'attention en tant que processus unique de traitement n'existe donc pas. Il existe en réalité plusieurs familles de processus cognitif regroupé sous le même terme. Ces processus ont un fonctionnement et des réseaux cérébraux distincts (Petersen & Posner, 2012). De nos jours, il est clairement admis que l'attention est un processus largement distribué et multidimensionnel. On l'aborde donc à la fois comme une fonction de sélection,

de distribution de ressources, de régulation et de contrôle du comportement (Possamaï & Requin, 1990). Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi la définition de l'attention établie par Michael Posner (Posner, Snyder, & Davidson, 1980). Selon cette définition, l'attention est l'ensemble des mécanismes de sélection de l'information et de sélection des étapes de traitement de l'information sélectionnée. Selon cette théorie, l'attention nous permet de faire le tri dans les informations qui émanent de notre environnement et de discriminer les informations utiles de celles qui ne le sont pas lors de l'activité en cours, puis de sélectionner l'action à entreprendre et les étapes de traitements nécessaires à l'élaboration de cette action. Elles se décomposent en 3 mécanismes principaux : l'alerte, l'orientation de l'attention et le contrôle exécutif.

1. Le réseau d'alerte permet une modulation non sélective de la vigilance (éveil). Il mobilise les fonctions mentales en cessant les activités en cours pour que l'organisme puisse évaluer la nouvelle situation. Dit simplement, le réseau d'alerte nous signale « quand porter attention ». C'est ce réseau que l'on utilise lorsqu'un klaxon retentit alors que l'on conduit. Une fois ce système activé, on sollicitera très probablement le deuxième système : le réseau d'orientation.
2. Le réseau d'orientation nous indique « sur quoi » prêter attention. Il correspond à notre capacité à sélectionner une information sensorielle ou mentale parmi plusieurs. On l'utilisera si après le klaxon, on réussit à identifier la voiture qui nous a klaxonnés. On sélectionnera cette voiture qui subira un traitement privilégié pendant quelque temps afin d'établir le comportement approprié. Si plusieurs comportements se présentent comme solution, alors nous ferons entrer en jeu le troisième réseau de l'attention : le contrôle cognitif.
3. Le réseau du contrôle exécutif nous indique « comment traiter les informations ». C'est

lui qui permet l'activation de l'ensemble des processus sous-jacents à la planification, la sélection, l'initiation, l'exécution et la supervision des comportements volontaires dirigés vers un but (Dehaene, 2015).

Dans cette thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement aux processus responsables de la sélection d'information dans notre environnement. En d'autres termes, au processus d'attention sélective que constitue le deuxième réseau de l'attention : l'orientation de l'attention.

La cécité inattentionnelle

S'il existe des processus de sélection, c'est parce que nous ne traitons qu'une partie des informations qui émanent de notre environnement. Si les troubles de l'attention sont maintenant bien connus du grand public notamment pour les problèmes qu'ils génèrent à l'école, aussi bien pour les professeurs que pour les parents, nul besoin de pathologie pour manquer d'attention. Nous ne savons pas tout ce que nous entendons sans écouter et tout ce que nous voyons sans regarder. Les phénomènes de cécité intentionnelle en sont le meilleur témoin. Pour mettre en lumière ce phénomène, il suffit de demander par exemple à des sujets de trouver une pièce cachée en dessous d'un gobelet. Prenez suffisamment de gobelets pour surcharger les réseaux attentionnels d'informations (>8) que vous placerez avec le gobelet qui contient une pièce. Mélangez et demandez aux participants, où se trouve la pièce. Facile, n'est-ce pas ? Maintenant, refaites la même expérience, mais au milieu de l'expérience changez l'un des gobelets par un autre gobelet de couleur différente ou même, un autre objet. Ne dites rien aux sujets et demandez-leur de trouver la pièce comme précédemment. Je suis sûr qu'ils l'ont trouvé ! Mais ont-ils remarqué le changement que vous avez effectué ? Il y a de grandes chances que non. Absorbés par la tâche qui leur a été confiée, ils sont devenus aveugles aux informations non pertinentes pour trouver la pièce. Ils ont été victimes de cécité

intentionnelle, aussi qualifiée de résistance au changement (faites l'expérience vous-même : https://www.youtube.com/watch?v=LfuRxwzF_MI). Cette cécité intentionnelle montre les limites de nos capacités cognitives et met en exergue la sélection, consciente ou non, des informations nécessaires au bon déroulement de l'activité en cours, mais également la nécessité de faire attention à quelque chose pour en prendre conscience. En effet, les yeux ont bien reçu toutes les informations visuelles durant la tâche et ont bien vu le changement de couleur, mais nous n'en avons pas pris conscience, nous ne l'avons pas regardé. Pour prendre conscience d'une information visuelle, et donc la regarder, il faut y porter son attention afin d'effectuer un traitement approfondi.

1.2.2 Attention Sélective

"Des millions de choses de l'ordre extérieur sont présentes à mes sens sans jamais entrer véritablement dans mon expérience. Pourquoi ? Parce qu'elles n'ont pas d'intérêt pour moi. Mon expérience, c'est ce à quoi j'accepte de me rendre attentif. Seules ces choses que je remarque forment mon esprit – sans intérêt sélectif, l'expérience est un pur chaos. [...] La focalisation, la concentration, de la conscience définit l'essence de l'attention. Elle implique un retrait de certaines choses afin de s'occuper effectivement des autres, et c'est une condition qui a son opposé dans l'état de confusion, d'inhibition et de dispersion mentales qui s'appelle distraction en français et Zerstreutheit en allemand."

William James, The Principles of Psychology

Pour évoluer dans le monde qui nous entoure, la nature nous a dotés d'un système cognitif des plus puissants, capable de traiter rapidement une grande quantité d'informations. Par l'intermédiaire de nos sens, qui nous fournissent des informations essentielles nécessaires à

notre survie, nous percevons le monde qui nous entoure et nous y adaptons. Chacune de ces informations est potentiellement importante et peut nécessiter un traitement approfondi afin d'élaborer un comportement efficient. Mais, aussi puissant soit-il, notre système cognitif n'a pas les capacités de traiter rapidement et précisément la quantité phénoménale d'informations qu'il reçoit. La nature nous a donc dotés de capacités ingénieuses, capables de faire le tri dans ce torrent d'informations émanant de notre environnement, et de sélectionner les informations importantes tout en inhibant les informations non pertinentes. Cette sélection permet de maintenir le traitement de l'information à un niveau élaboré. La représentation qui en résulte est une base pour l'accès à la conscience et la décision d'action Sieroff 2004. Ces capacités font référence à ce que les chercheurs ont regroupé sous le terme « attention sélective ».

L'attention sélective regroupe un ensemble de processus qui permettent aux individus de favoriser le traitement cognitif de stimuli ou de pensées au détriment d'autres stimuli ou pensées (Harris & Thiele, 2011, cité par Dufour, Lithfous, & Després, 2018). En d'autres termes, elle permet à un individu de favoriser le traitement d'une information, tout en inhibant les éléments distrayants. L'effet appelé "*Cocktail party*" (Bronkhorst, 2015) est probablement l'exemple le plus connu. Cet effet est appelé ainsi, car il correspond à notre capacité à nous concentrer sur une seule discussion lorsque nous sommes dans un environnement sonore complexe où plusieurs discussions ont lieu simultanément. Cette sélection peut se faire dans différentes modalités sensorielles, telles que les modalités auditives et visuelles. Nous pouvons par exemple, sélectionner la couleur ou la forme d'un objet afin d'en favoriser le traitement. Lorsque ce sont les caractéristiques spatiales d'un stimulus qui sont sélectionnées, nous employons le terme "d'attention spatiale". Ces processus de sélection ont majoritairement été étudiés dans la modalité visuelle (Siéoff & Piquard, 2004) même si de nombreuses études existent dans la modalité auditive (Bouma

& Gootjes, 2011). L'une des raisons est que ces études sont souvent effectuées au regard du vieillissement de l'individu et que c'est l'attention visuelle qui semble la plus sensible aux altérations liées à l'âge (Guerreiro, Adam, & Van Gerven, 2012; Guerreiro, Murphy, & Van Gerven, 2010).

De nombreux protocoles et paradigme expérimentaux existe pour étudier et mesurer ces propriétés sélectives de l'attention. Ci-dessous une liste non exhaustive des tâches sans doutes les plus utilisés dans l'étude de l'attention sélective :

- Tâche de recherche visuelle de Treisman (test de barrage): sélection de cible parmi des distracteurs (A. Treisman, 1977)



Figure 1.2. Test de barrage tiré de Laurent-Vannier, Pradat-Diehl, Chevignard, Abada, and De Agostini (2003)

- Tâche d'Eriksen et Flankers : effet de la présence de distracteur sur le traitement d'une cible qui ne nécessite pas de recherche visuelle (B. A. Eriksen & Eriksen, 1974)

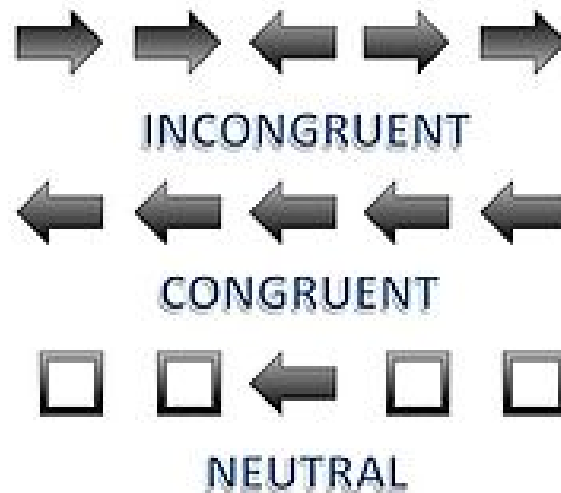


Figure 1.3. Tâche de Flankers

- Tâche de Navon : focalisation sur l'aspect globale ou locale d'une information (Navon, 1977)
- Trail Making Test : relier des informations visuelles entre elle, relié les numéros présents sur une feuille par ordre croissant (Reitan, 1958).
- Test des figures enchevêtrées : identification de figure enchevêtrée (Gainotti et al., 1986).

1.2.3 Orientation de l'attention

Lorsqu'une information est nouvelle, surprenante, inattendue, on peut observer des variations comportementales qui témoignent d'une réaction particulière à cette information : c'est la

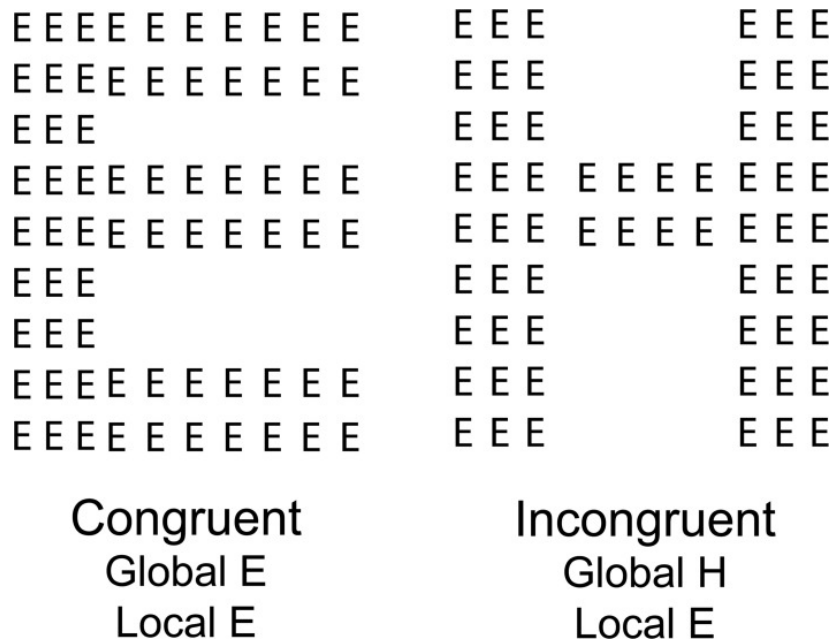


Figure 1.4. Tâche de Navon tiré de Watson (2013)

réaction d'orientation. Elle s'accompagne généralement d'une augmentation de la fréquence cardiaque et ventilatoire, et d'une orientation des yeux et de la tête dans la direction de l'information surprenante. Cette réaction, qui comporte des caractéristiques végétatives, motrices et cognitives, prépare l'organisme à réagir à l'information nouvelle (Roulin 2006). Comme nous l'avons dit précédemment, nos systèmes perceptifs sont nombreux et reçoivent en permanence une grande quantité d'informations. Néanmoins, il nous est impossible de diriger notre attention sur tous les stimuli simultanément. En revanche, nous pouvons sélectionner un stimulus spécifique en dirigeant notre attention. En d'autres termes, nous déplaçons notre attention en direction de stimuli présents dans notre champ perceptif en vue d'une analyse plus approfondie. Dans le domaine visuospatial, nous parlons alors de système d'orientation attentionnelle (Posner, 1980). Cette orientation attentionnelle nous permet de diriger notre attention vers un endroit précis de notre champ visuel afin de préparer le

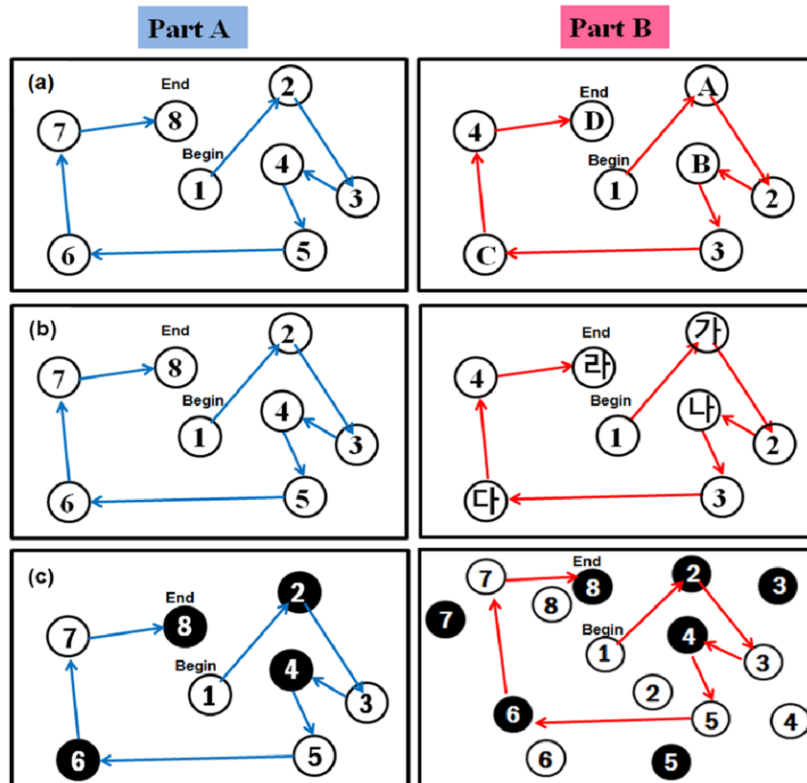


Figure 1.5. Trois versions du "Trail Making Test" tiré de Kim, Jang, Baek, and Kim (2016)

traitement de l'information susceptible d'être contenue ou d'apparaître à cet endroit. Cette orientation se décompose en 3 étapes principales : **l'engagement** de l'attention vers une certaine région du champ visuel et un **désengagement** de l'attention de la zone visuelle investie afin de se **ré-engager** vers une autre localisation. Cette capacité d'orientation attentionnelle a été étudiée principalement via un paradigme expérimental, devenu le plus utilisé dans le domaine de l'orientation de l'attention, le Paradigme de Posner (également appelé, tâche de Posner, paradigme d'indication spatiale, "*cueing paradigm*").

1.2.3.1 Le paradigme de Posner

En 1980, Michael Posner propose un paradigme expérimental (figure 1.6), pour mesurer les capacités d'orientation visuospatiale de l'attention, qui sera réutilisé par la suite dans de nombreuses études. Dans la version classique du paradigme d'indication de Posner, un participant est invité à répondre le plus rapidement possible à l'aide d'un bouton réponse lorsqu'il voit apparaître une information (cible) à l'écran. Un point de fixation est présenté au centre de l'écran d'ordinateur, ainsi que deux rectangles positionnés à gauche et à droite de ce point. Après un intervalle temporel, un indice (CUE) est présenté brièvement avant l'apparition de la cible qui apparaît dans l'un des deux rectangles. La principale manipulation consiste en l'utilisation d'un indice qui entretient trois types de relation avec la cible. Un indice est dit « valide » quand il fournit une information correcte sur la position que la cible occupera (ex. illumination brève du rectangle de gauche, alors que la cible apparaît à gauche). L'indice peut également entretenir une relation « invalide » en indiquant la localisation opposée (ex. illumination brève du rectangle de gauche, alors que la cible apparaît à droite). Enfin, l'indice est « neutre » lorsqu'il ne renseigne pas sur la localisation de la cible (ex. illumination des deux rectangles simultanément). Ces trois conditions de validité (essais valides, invalides ou neutres) permettent ainsi, par comparaison des temps de réponse (TR) du sujet, de savoir si les individus tirent bénéfice de l'indice ou non. L'utilisation de l'indice reflète alors la capacité de l'individu à diriger son attention visuospatiale.

Les principaux résultats des travaux de Posner ont démontré que l'utilisation d'indices spatiaux informant l'individu sur la position effective de la cible (valide) ou une position erronée (invalide), modifiaient le traitement de la cible en engendrant des coûts ($TR_{\text{Invalide}} > TR_{\text{Neutre}}$) ou des bénéfices ($TR_{\text{valide}} < TR_{\text{Neutre}}$) comparés aux conditions sans indice (neutre). L'effet de validité, qui est la différence entre les essais valides et invalides (ou valide et neutre), nous fournit une mesure quantitative de l'effet de l'orientation spatiale sur

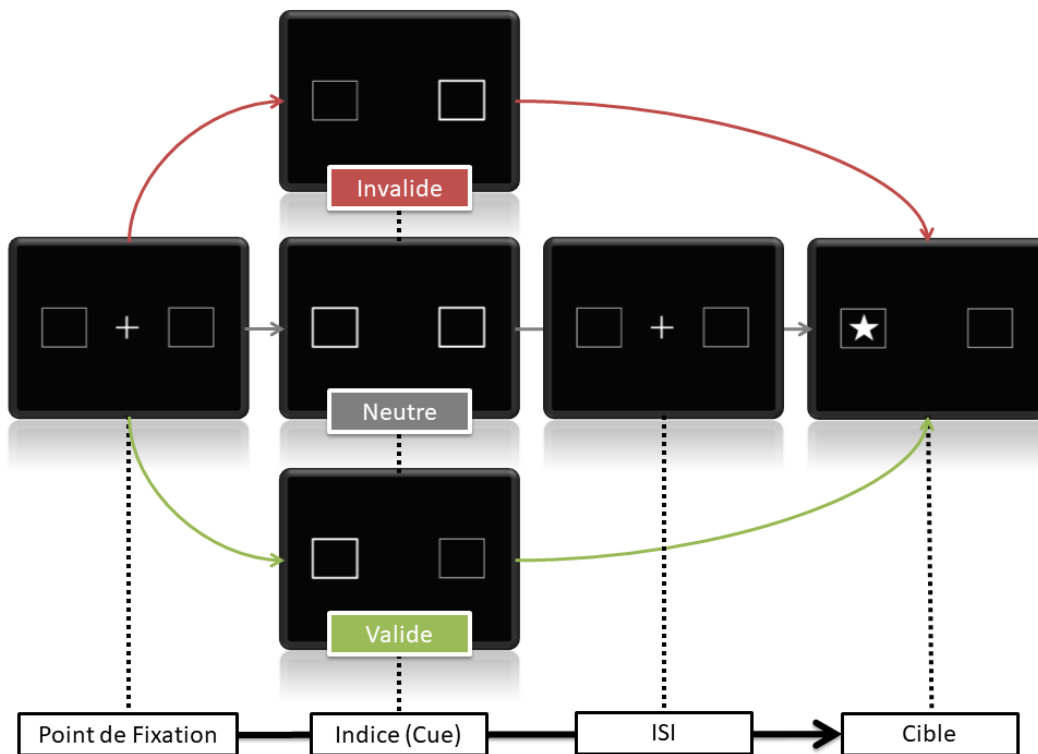


Figure 1.6. Schéma d'un essai dans le Paradigme de Posner (1980)

le traitement des informations visuelles.

Résultats typiques : **TR VALID < TR NEUTRE < TR VALIDE**

Ces résultats ont été observés aussi bien dans des tâches de détection que de discrimination (Chica & Lupiáñez, 2009; Chica, Sanabria, Lupiáñez, & Spence, 2007; Lupiáñez, Milán, Tornay, Madrid, & Tudela, 1997; Martín-Arévalo, Kingstone, & Lupiáñez, 2013). C'est-à-dire dans une simple tâche de temps de réaction à un stimulus (détection) ou dans une tâche de réaction de choix où les sujets doivent sélectionner une information spécifique parmi plusieurs possibles (discrimination/identification). Ces résultats ont également été confirmés par d'autres

mesures que les temps de réponse motrice comme les mesures physiologiques (Handy, Jha, & Mangun, 1999; Hawkins et al., 1990). De plus, ils s'observent également, dans d'autres modalités sensorielles. En effet, il a été montré que l'orientation attentionnelle audiospatiale possède des caractéristiques communes avec l'attention visuospatiale (Farah, Wong, Monheit, & Morrow, 1989; Santangelo, Van der Lubbe, Belardinelli, & Postma, 2006). De plus, les recherches actuelles suggèrent que l'attention spatiale auditive partage un fonctionnement commun au niveau cérébral, précédemment associée à l'attention visuospatiale (D. V. Smith et al., 2010; Wu, Weissman, Roberts, & Woldorff, 2007). Des phénomènes similaires en perception haptique ont également été constatés (Tan, Gray, Spence, Jones, & Rosli, 2009; Tan, Gray, Young, & Irawan, 2001; Young, Tan, & Gray, 2003). Il a même été démontré qu'il existait des processus d'orientation temporelle grâce à une version modifiée de ce paradigme en remplaçant les indices spatiaux par des indices temporels qui indique aux participants le moment d'apparition de la cible au lieu de sa localisation spatiale (A. C. Nobre, 2001). Si ces résultats semblent assez intuitifs, et qu'il paraît "logique" de répondre plus rapidement lorsque l'on sait où une information va apparaître, ces résultats sont en fait tributaires de variables et de paramètres, qui, si mal utilisés, peuvent même inverser les résultats et détériorer le traitement de l'information. Il est donc important de connaître ces variables et de les maîtriser lorsque l'on utilise le paradigme de Posner afin de mesurer et d'étudier expérimentalement les processus d'orientation de l'attention.

1.2.3.2 L'orientation exogène et endogène

Nous avons vu que parmi les caractéristiques des processus attentionnels figurent un aspect de contrôle de l'action. Dans la théorie de Posner, elle est représentée notamment par le réseau des fonctions exécutives. Les processus de contrôle permettent de gérer les ressources cognitives nécessaires à la réalisation d'actions volontaires et s'opposent au processus

de traitement automatique qui ne requiert aucune attention (voir par exemple : Paillard, 1985). Par exemple, lorsque nous téléphonons en marchant, la marche, qui est une action motrice complexe, peut être gérée par des processus automatiques qui ne consomment pas de ressources, afin de nous permettre d'orienter mentalement notre attention sur la conversation téléphonique en usant de nos processus de contrôle volontaire. Si un obstacle se présente sur notre chemin, cette modification des conditions environnementales pourra nécessiter une prise de contrôle consciente du processus de marche afin de franchir cet obstacle. Nous devons alors inhiber le processus automatique de marche et prendre volontairement son contrôle, afin d'allouer des ressources cognitives pour effectuer un traitement qui n'a pas encore été automatisé ou qui ne peut être automatisé. Vous pourrez alors franchir l'obstacle, laps de temps pendant lequel vous aurez sans doute perdu le fil de la conversation ou tout du moins manqué quelques informations. Cette dichotomie entre processus automatique et processus volontaire se retrouve dans les processus d'orientation de l'attention. Ainsi, un stimulus perceptif émis dans notre environnement (alarme sonore, flash lumineux, voix lointaine, etc.) est capable d'activer des processus automatiques et/ou volontaires. L'on distinguera alors l'orientation exogène (processus automatique) et l'orientation endogène (processus volontaire).

Dans la version classique du paradigme, l'utilisation d'un indice périphérique (l'illumination du rectangle à gauche ou à droite) provoque une capture exogène de l'attention, c'est-à-dire une capture automatique de l'attention à l'emplacement indiqué. C'est ce type d'orientation qui entre en jeu lorsque vous tournez la tête en direction d'un bruit inattendu dans votre environnement. C'est la "sillance" du stimulus qui contraint l'individu à faire attention à cette information. La "sillance" étant la faculté du stimulus à être facilement perçu par rapport aux autres stimuli de son environnement, de par sa luminosité, couleur, forme, etc. (voir partie 1.2.3.2). En changeant l'illumination du rectangle et en le remplaçant par un

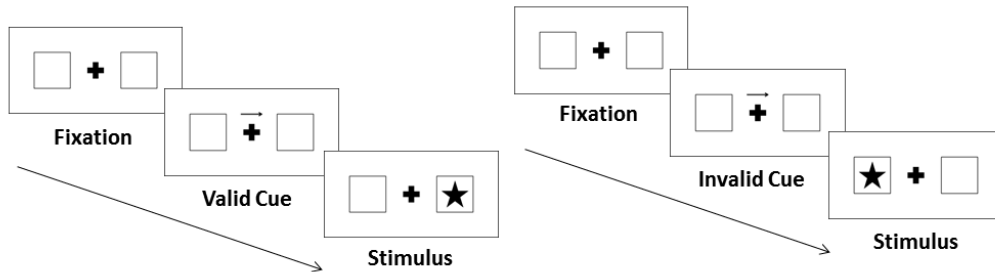
symbole ou une information (par exemple, une flèche centrale pointant vers la gauche ou vers la droite), l'on provoque alors une orientation endogène (volontaire) de l'attention. En effet, les symboles telles que les flèches directionnelles nécessitent un décodage et une intention d'orienter son attention vers l'emplacement de la cible. Dans ce type d'orientation, ce n'est plus "la saillance" du stimulus qui va attirer l'attention du participant, mais sa pertinence (son utilité dans la tâche en cours), qui sera donc définie par l'individu lui-même. C'est ce que nous faisons par exemple, lorsque nous lisons un panneau d'avertissement "sol mouillé" et que nous faisons ensuite attention à la surface mouillée afin de ne pas glisser.

L'orientation endogène de l'attention est donc issue de l'influence des intentions, des attentes, des expériences ou des buts de l'individu sur le traitement de la tâche en cours. C'est un processus de haut niveau qui influence le traitement effectué à un niveau plus bas. Aussi appelé processus Top-Down ou descendant. Dans ce type de processus, c'est l'individu qui décide consciemment d'entreprendre une action dans son environnement. Ce sont des processus qui sont sous le contrôle de l'individu et qui demandent des ressources attentionnelles. En revanche, l'orientation exogène de l'attention est un processus automatique ("pré-attentif") déclenché par la "saillance" des stimuli, c'est-à-dire par des événements externes à l'individu. Le processus est ascendant (Bottom-up) et est défini dans la hiérarchie cognitive comme un processus de bas niveau. Dans ce type de processus, c'est l'environnement qui contraint l'individu à l'action, qu'elle soit motrice ou cognitive. L'individu ne peut pas contrôler ce type de processus et il ne consomme pas de ressource attentionnelle.

Prédictivité des indices

Une notion importante dans le paradigme de Posner est la prédictivité de l'indice. La prédictivité étant le ratio d'essais valides et d'invalides au sein d'un bloc expérimental. Pour

Endogenous Cues



Exogenous Cues

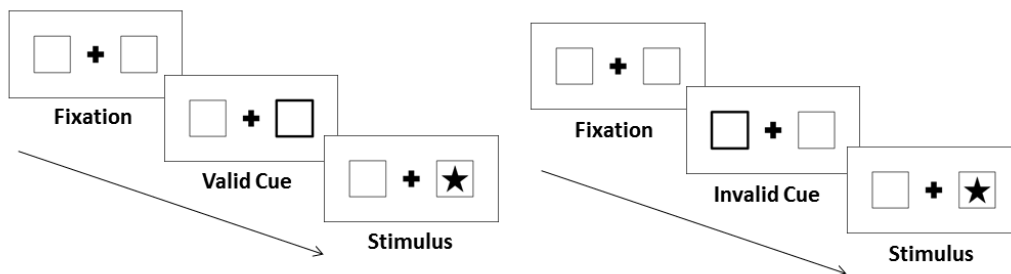


Figure 1.7. Indice exogène et endogène dans le Paradigme de Posner (1980)

que l'indice soit prédictif, il doit indiquer dans la majorité des cas la bonne position de la cible (en général : 75% - 80% d'essais valides). Pour que les individus usent de leur processus d'orientation endogène, il est nécessaire que l'indice soit prédictif (>60%). Cette prédictivité ajoute à l'indice une qualité « informative » puisque le participant comprend aisément et rapidement que l'indice informe avec une grande probabilité la position future de la cible. Il va alors privilégier le rôle de l'indice, déterminer une stratégie d'orientation et déplacer de façon volontaire son attention à l'endroit où la cible a le plus de chance d'apparaître ; stratégie qu'il ne mettrait pas en place si l'indice n'était pas prédictif. Sans cette prédictivité, l'indice peut-être ignoré par les participants puisque non pertinent pour la réalisation de

la tâche, voir perturbant. La plupart du temps, le pourcentage de prédictivité est fourni au participant afin qu'il ait connaissance de la fiabilité ou non-fiabilité de l'indice selon les besoins expérimentaux. Notons également que les indices périphériques (non-central) provoqueront une orientation exogène à l'endroit indicé, peu importe leur prédictivité. Il est donc important de placer les indices au centre lorsque l'on veut manipuler uniquement l'orientation endogène dans le paradigme de Posner. Précisons également que les indices peuvent être mixtes et avoir des composantes exogènes et endogènes en manipulant ces deux variables (prédictivité, position sur l'écran).

En manipulant le pourcentage de prédictivité de l'indice afin de le rendre non perfectif (50%) ou prédictif (70%, 80%). Il est possible de déterminer si un indice nécessite l'engagement de processus automatique ou volontaire afin de provoquer une orientation de l'attention. En effet, si en utilisant un indice qui possède une prédictivité de 50% et qui produit des temps de réponse plus rapides lorsque celui-ci est valide plutôt qu'invalidé alors c'est qu'il ne nécessite pas un contrôle volontaire, il attire automatiquement l'attention. En revanche, si l'on ne constate aucune différence de temps de réponse, c'est que cet indice nécessite l'activation de processus d'orientation volontaire et n'attire pas automatiquement l'attention.

J'ai utilisé précédemment comme exemple, une flèche directionnelle, comme guidage de l'attention volontaire. En effet, dans le paradigme d'indiçage établi par Posner en 1980, il utilisait une flèche pour orienter volontairement l'attention de l'individu. Cependant, des études récentes nous éclairent un peu plus sur les mécanismes entraînant une orientation exogène de l'attention et sur l'automaticité de certains types d'indices que les chercheurs avaient définis trop tôt comme des indices nécessitant l'intervention consciente de l'individu. Il est vrai qu'au départ, tout symbole était considéré comme endogène lorsqu'il nécessitait un décodage puis une intention de diriger son attention. Or, il a été démontré que des indices

symboliques pouvaient en réalité avoir un effet de capture automatique.

Ainsi, les gestes sociaux tels que « montrer du doigt » ou la direction du regard de quelqu'un déclencheraient automatiquement une orientation attentionnelle à la position indiquée par le doigt ou le regard de la personne. En effet, si par exemple on vous demande de détecter une cible à gauche ou à droite d'un point de référence en vous donnant comme indication un visage qui regarde à droite ou à gauche, vous répondrez plus rapidement lorsque le regard sur le visage indique la bonne position de la cible (regard à gauche/cible à gauche), que lorsque celle-ci n'indique pas la bonne position, et ceci même si la prédictivité de l'indice est nulle (50 % du temps le visage n'indique pas la bonne position). Ce qui montre bien que l'orientation de ce type d'indice est automatique, car la personne sait que celui-ci n'avait aucune utilité dans la réalisation de la tâche (Friesen & Kingstone, 1998; Kunde, Skirde, & Weigelt, 2011; Langton, Watt, & Bruce, 2000). Cet effet a également été démontré avec des symboles à forte composante spatiale tels que les mots « droite » et « gauche » ou les flèches directionnelles (Eimer, 1997; Gibson & Bryant, 2005; Hommel, Pratt, Colzato, & Godijn, 2001; Pratt, Radulescu, Guo, & Hommel, 2010; ?. Il est donc maintenant bien admis que ces types d'indices ont une forte composante exogène et ne subissent pas toujours un contrôle volontaire (Stevens, West, Al-Aidroos, Weger, & Pratt, 2008). Néanmoins, une étude récente de Reuss, Pohl, Kiesel, and Kunde (2011), insiste sur le fait que même si les indices, comme les flèches directionnelles et l'orientation du regard, appellent des mécanismes comparables aux mécanismes exogènes, ils subissent néanmoins des influences Top-Down. En effet, dans leur étude, lorsqu'une flèche directionnelle est présentée en subliminale (non perçu consciemment) avec une prédictivité de 50%, l'effet de validité n'existe pas. En revanche, l'effet de validité réapparaît lorsque la prédictivité de l'indice passe à 80%. Les flèches ont donc besoin d'être prédictives pour fonctionner en présentation subliminale et subissent donc des influences descendantes (Top-Down). Notons que dans cette thèse, nous considérerons

les flèches directionnelles en tant qu'indice endogène afin de garder une cohérence avec le paradigme de Posner classique et la littérature existante.

Cette ambivalence de certains indices qui sont à la frontière des processus exogènes et endogènes nous montre l'importance d'effectuer un choix rigoureux lors du choix des indices utilisés. En effet, ces deux familles de processus ont un fonctionnement bien différent. Dans une perspective applicative, il sera donc important de déterminer qu'elle type d'indice utiliser afin d'orienter l'attention des individus.

Caractéristiques perceptives des indices

Comme nous l'avons vu précédemment l'attention d'une personne peut être dirigée de façon automatique ou volontaire. De nombreuses études ont tenté de déterminer quelles caractéristiques perceptives étaient à même d'induire une orientation exogène de l'attention. Yantis et Jonides (1984; 1990) montrent qu'un item d'apparition soudaine ou en mouvement était plus facilement traité qu'un item d'apparition progressif ou statique. Theeuwes, 1992 observe qu'une discontinuité de couleur ou de forme peut capturer l'attention d'une personne en fonction de la saillance qu'elle induit. Wolfe & Horowitz, 2004 ont inventorié les attributs perceptifs capables de guider l'attention de manière certaine, ils citent : la couleur, le mouvement, l'orientation et la taille. Cependant, il est encore difficile aujourd'hui de déterminer quelles caractéristiques ou quels principes permettent, ou ne permettent pas, de capturer automatiquement l'attention de quelqu'un. Il semblerait néanmoins que la « saillance » soit un élément essentiel. Même si la définition de saillance ne fait aujourd'hui encore l'objet d'aucun consensus (Fernandez, 2010).

En ce qui concerne l'orientation endogène, c'est-à-dire volontaire de l'attention. Il n'existe aucun attribut perceptif spécifique permettant d'induire à lui seul une telle orientation. En

effet, cette orientation étant dépendante des intentions de l'individu, elle obéit plutôt à une notion de pertinence, c'est-à-dire, l'utilité de l'information pour l'individu qui doit orienter son attention durant l'activité en cours. Une consigne, un symbole, ou tout autre type d'informations fournissant à l'individu des indications spatiales (ou temporelles) fiables pourront permettre le déclenchement par l'individu d'une orientation endogène. C'est donc la probabilité de l'information à orienter l'attention de la personne au bon endroit (ou au bon moment) qui sera importante et qui déterminera sa fiabilité. En effet, si un symbole ou une consigne n'indique pas avec une probabilité supérieure à 50 % la bonne position ou le bon moment ou orienter son attention, l'individu n'utilisera pas cet indice et le jugera comme non pertinent (70 % minimum conseillé). Au-delà de cette probabilité minimale, c'est essentiellement la motivation ou du moins la propension à utiliser cette information qui est susceptible d'impacter l'orientation endogène du participant (Fernandez, 2010).

Stimulus Onset Asynchronie (SOA)

Il est important de noter que l'orientation de l'attention dans l'espace prend du temps. Il a été observé que les deux types d'orientation, exogène et endogène, différaient au niveau de leurs évolutions temporelles. Ces observations ont été faites en manipulant l'intervalle entre le début d'apparition de l'indice et le début d'apparition de la cible (SOA) ou l'intervalle de temps entre la fin d'apparition de l'indice et le début d'apparition de la cible (ISI), (voir figure 1.8). Le SOA correspond, en fait, à l'ISI auquel on ajoute le temps d'apparition de la cible (qui peut être variable selon les expériences). Ainsi, l'on a pu constater que l'orientation endogène de l'attention prend un certain temps à se développer, ces bénéfices n'apparaissant que pour des SOA supérieur à 300 ms (Müller and Rabbitt 1989). Cependant, une fois engagés, les bénéfices durent pendant de long SOA (jusqu'à une seconde). En revanche,

l'orientation exogène se développe beaucoup plus rapidement (SOA=150ms ; Müller & Rabbitt, 1989). Mais, contrairement à l'attention endogène, ces bénéfices s'inversent pour des SOA longs (> 300 ms). C'est-à-dire que les temps de réponse d'un individu peuvent devenir plus lents lorsqu'il sait où l'indice va apparaître que lorsqu'il ne sait pas (inversion des coûts et des bénéfices = inhibition de retour). Lorsque l'on étudie les processus d'orientation via le paradigme de Posner, il est donc nécessaire de prendre en compte cet intervalle de temps entre l'indice et la cible. Une mauvaise gestion de cet intervalle peut rendre l'indice inefficace, notamment pour les indices exogènes. De plus, dans une perspective applicative cet intervalle de temps devra être adapté en fonction du type d'indice utilisé afin de guider efficacement l'attention et ne pas produire des coûts de traitements supplémentaires qui iraient à l'inverse de l'effet souhaité.

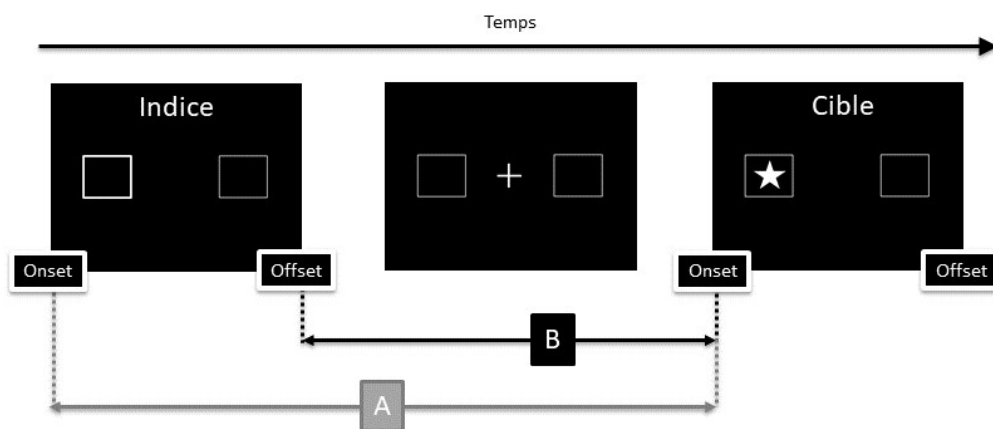


Figure 1.8. A. Stimulus Onset Asynchrony (SOA). B. Interstimulus interval (ISI)

Inhibition de retour (IOR)

En 1984, Posner et Cohen ont observé, lors de l'utilisation d'indices exogènes, que pour des

SOA longs, la balance coût/bénéfice s'inversait et l'ont appelé par la suite (Posner, Rafal, Choate, & Vaughan, 1985) inhibition de retour (IOR). Ce nom a été donné à cet effet, car les auteurs considéraient qu'il était le reflet d'un biais inhibiteur empêchant l'attention de se relocaliser à un endroit déjà analysé. En d'autres termes, notre système attentionnel ne supporterait pas d'explorer automatiquement deux fois le même endroit de l'espace, s'il a déjà jugé le traitement spatial de cette zone comme non pertinente. Seule l'attention volontaire permettrait de rester « concentrer » et d'analyser un même endroit de l'espace en continu. Les causes de l'IOR ont souvent été expliquées par l'engagement puis le désengagement de l'attention à un emplacement spécifique qui empêcherait l'attention de se réorienter à cet endroit (Posner, 1995). D'autres explications suggèrent que l'IOR est causé par l'activation des processus responsables des mouvements oculaires (Rafal, Calabresi, Brennan, & Sciolto, 1989). Mais, aujourd'hui encore, aucun consensus n'a été trouvé pour expliquer ce phénomène. Enfin, il est noté que l'apparition de l'IOR dépend également de la tâche effectuée. Ainsi, Lupiáñez et al. (1997) ont montré que l'IOR apparaissait plus tard dans des tâches de discrimination de couleur que dans des tâches de détection. L'IOR commencerait également plus tôt dans la mesure des réponses saccadiques (mouvements des yeux) que lors de réponse manuelle (Briand, Larrison, & Sereno, 2000). Beaucoup de données convergent et suggèrent que l'IOR retarde les réponses motrices et le réengagement attentionnel. Dans une perspective applicative, il sera donc nécessaire de déterminer quelles tâches (détection, identification, décision, recherche visuelle, etc) et quelles actions (oculomotrice, motrice, cognitif, par exemple) l'individu doit effectuer.

Interaction endogène et exogène

De nombreuses hypothèses ont été soulevées au niveau de l'interaction entre l'orientation endogène et exogène de l'attention afin de déterminer quel type d'orientation est prioritaire

dans le traitement de l'information ou si les deux types d'orientations peuvent agir ensemble. Autrement dit, il se peut que les deux types d'orientation aient un poids comparable dans le contrôle de l'orientation ou bien que l'une d'elles ait la priorité sur le contrôle attentionnel. Yantis and Jonides (1990) ont montré qu'une orientation endogène de l'attention permettait de supprimer des effets de captures attentionnelles induits par l'apparition soudaine d'un distracteur (exogène). Laissant penser que l'orientation endogène affiche une influence plus forte que l'orientation exogène. De plus, selon Müller & Rabbitt, 1989 l'orientation endogène est capable d'amplifier ou de diminuer indirectement l'orientation exogène. Cependant, on peut reprocher à ces études de ne faire intervenir l'orientation exogène qu'après avoir orienté l'attention des participants de manière endogène (apparition de distracteur, flash sur la cible, etc.). Il se peut alors que ce soit l'indice traité en premier (endogène/exogène) qui est la priorité dans le traitement de l'information, l'orientation exogène étant appelée après l'orientation endogène. Il est encore difficile aujourd'hui de déterminer si ces deux processus sont en compétition ou s'intègrent au niveau du traitement de l'information. Néanmoins, on ne peut pas nier l'existence d'une interaction de ces deux types d'orientations. Cette interaction pourrait même expliquer une partie des phénomènes de tunnélisation.

La tunnélisation ou « effet tunnel » est un phénomène observé chez les pilotes durant lequel ceux-ci deviennent « sourds » aux alarmes qui retentissent et aux informations d'alerte qui s'affichent sur le tableau de bord, car ils sont absorbés dans une autre tâche qui semble focaliser toute leur attention (Béquet, Hidalgo-Muñoz, Moreau, & Jallais, n.d.; Regis, 2011; Thooris, 2011). On sait pourtant qu'une information saillante devrait provoquer une capture automatique de l'attention. Comment cette orientation exogène, un processus automatique hors du contrôle de l'individu, peut-elle ne pas avoir eu lieu ? C'est une question qui aujourd'hui encore, cherche une réponse. L'on peut supposer qu'elle ait été entendue, mais ignorée par les pilotes, car ils l'ont estimée non pertinente. Mais d'après les interviews

effectuées auprès des pilotes, ils n'ont vraiment pas entendu l'alarme et sont même surpris quand on leur annonce qu'ils l'ont "ignoré". En effet, l'un des aspects les plus déstabilisants du manque d'attention, c'est qu'on ne se rend même pas compte que nous avons loupé une information. Justement, nous n'y avons pas fait attention et donc nous n'en avons pas pris conscience. Si l'on peut faire attention à quelque chose sans avoir conscience (cf. processus exogènes), nous ne pouvons avoir conscience de quelque chose sans faire attention. Cependant, les processus exogènes émanent d'un stimulus saillant ne sont pas tributaires de la conscience. L'alarme qui a retenti et qui produit normalement une orientation exogène a-t-elle perdue de sa saillance pour ne pas provoquer une orientation automatique. L'on peut en effet se demander, si une autre tâche à forte demande endogène aurait pu empêcher les processus d'orientation exogène d'agir pour rediriger le pilote vers l'information saillante. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, il a été montré que les processus d'orientation endogène pouvaient permettre d'inhiber les effets de l'orientation exogène (Yantis & Jonides, 1990). L'interaction qu'il existe entre les processus d'orientation exogène et endogène pourrait être une explication possible au phénomène de tunnélisation. Les effets de tunnélisation étant rares et difficiles à reproduire en laboratoire, ceci n'est pour le moment que spéculation, et nous allons maintenant nous intéresser à un organe essentiel à la perception visuelle et à certains processus d'orientation de l'attention : l'œil et son mouvement.

1.2.3.3 L'orientation ouverte et couverte

Nous possédons de nombreux sens (ouïe, toucher, goût, odorat, vue, proprioception, nociception, etc) qui nous permettent de percevoir et de nous représenter le monde. Parmi ces sens, l'un d'eux semble privilégié chez l'être humain, la vision. Dans de nombreuses activités, nous avons le choix de donner la priorité à une modalité sensorielle plutôt qu'à une autre.

Par exemple, les automobilistes ou les pilotes d'avion peuvent se fier au bruit du moteur ou aux informations visuelles fournies par les multiples instruments du cockpit. Cependant, il semble que nous ayons tendance à nous fier davantage aux informations visuelles, un effet connu sous le nom de dominance visuelle de Colavita (Colavita, 1974; Spence & Santangelo, 2009). C'est peut-être pourquoi les études sur l'orientation de l'attention se sont majoritairement intéressées à l'attention visuelle. Et dans ce domaine, les yeux sont les rois.

Comme nous l'avons vu précédemment, les études pionnières en matière d'attention telles que celles de Posner se sont concentrées sur l'attention visuelle. La quasi-totalité de ces études a utilisé le temps de réaction moteur comme indice de la région de l'espace où l'attention est déployée. Pour certains auteurs, cette mesure est qualifiée d'indirecte est peut-être remplacée par une mesure plus directe qui est le suivi des mouvements oculaires. En effet, beaucoup d'étude suggèrent un lien étroit entre attention et mouvements des yeux (Awh, Armstrong, & Moore, 2006; Deubel & Schneider, 2003; Kowler, Anderson, Doshier, & Blaser, 1995; Rizzolatti, Riggio, Dascola, & Umiltá, 1987; D. T. Smith & Schenk, 2012). En 1995, Hoffman et Subramaniam montrent qu'un individu ne peut pas déplacer son regard à une certaine localisation spatiale et diriger son attention à une autre localisation spatiale au même moment (Hoffman & Subramaniam, 1995). Ces résultats suggèrent donc que l'attention visuospatiale est un important mécanisme dans la génération de mouvements oculaires volontaires. De plus, les mouvements des yeux dirigés vers une certaine localisation spatiale sont toujours précédés par un déplacement de l'attention visuel à la même localisation et ce couplage des mouvements oculaires et de l'attention serait obligatoire (Hoffman, 1998). Cependant, Posner en 1980 a montré qu'il peut y avoir orientation de l'attention sans mouvements des yeux, en montrant que les effets de son paradigme étaient également présents pour des temps ne permettant pas un mouvement des yeux (inférieur à 200 ms).

Les auteurs ont ainsi différencié l'attention qui ne s'accompagne pas de mouvements des

yeux (ou de la tête, du tronc, etc.) et l'ont désigné sous le terme d'attention couverte, implicite ou encore cachée. Quant à l'attention qui s'accompagne de mouvements des yeux, elle a été nommée ouverte, explicite ou encore manifeste. Deux types de processus d'attention visuelle, ouverte et couverte, coexistent au sein du système cognitif de chaque personne. Pour donner un exemple, lorsque vous souhaitez tirer dans un ballon de foot afin de mettre le dans le but, vous devez user de votre attention pour suivre la position du ballon sur le terrain, mais aussi à la position de buts et du gardien par rapport à vous. Pour réaliser efficacement cette action, vous devrez faire attention au même moment à ces deux régions de l'espace visuelle. Vous pourrez alors ouvertement regarder le ballon (attention ouverte) afin de "shooter" dedans correctement tout en faisant attention de manière cachée (attention couverte) à la position des buts et du gardien afin de tirer à l'emplacement qui vous semble le mieux pour mettre un but (figure 1.9).



Figure 1.9. Illustration d'un déploiement simultanée de l'attention couverte et ouverte

Lorsque l'on étudie l'attention ouverte, l'on pourra utiliser des technologies d'eye-tracking

pour mesurer l'activité oculaire des participants (saccade, fixation, diamètre pupillaire) et étudier les régions de l'espace où l'attention a plus ou moins été déployée. Lorsque l'on étudie l'attention couverte, l'on devra indiquer aux participants de ne pas utiliser leurs yeux afin qu'il n'appelle pas leur processus d'attention ouverte durant la tâche expérimentale afin de ne pas biaiser la mesure. C'est une des raisons pour laquelle un point de fixation est présent au centre de l'écran que le participant devra regarder jusqu'à l'apparition de la cible, c'est-à-dire jusqu'à la fin du traitement des processus d'orientation. Si le participant bouge les yeux avant l'apparition de la cible, il aura sollicité des processus d'orientation ouverte et non plus des processus d'orientation couverte. Dans cette thèse, nous souhaitons étudier les processus d'orientation couverte encore peu étudiés en comparaison aux processus d'orientation ouverte dont on trouvera une littérature florissante dans les nombreuses revues et conférences associées aux technologies d'eye-tracking. Nous avons choisi d'utiliser différents eye-trackers dans la majeure partie de nos études afin d'estimer et de contrôler la part imputable au processus d'attention couverte et celle imputable au processus d'attention ouverte dans nos expériences. En effet, le suivi oculaire est une méthode très sensible pour mesurer l'allocation de l'attention ouverte et peut révéler des effets attentionnels qui ne sont pas apparents en mesurant uniquement les temps de réponse et la précision.

1.2.4 Le guidage de l'attention

Comme nous l'avons vu, nos récepteurs sensoriels reçoivent en permanence une grande quantité d'informations et que nous ne pouvons traiter de manière approfondie et simultanée toutes ces informations. Pour traiter rapidement et précisément une information, comme tourner rapidement à droite ou à gauche en voiture pour éviter une collision avec une autre voiture qui arrive à contre sens, il faut sélectionner les informations pertinentes parmi les multiples informations qui nous parviennent. Est-ce que la route est dégagée ? Où puis-je

tourner pour éviter une autre collision avec un mur, un poteau ou pire, un piéton ou un cycliste qui passe par là au même moment ? Une fois ces informations sélectionnées, elles peuvent alors faire l'objet d'un traitement approfondi et nous pouvons engager l'action qui nous semble la plus appropriée. Ces propriétés sélectives de l'attention sont parmi l'une de ces caractéristiques les plus intéressantes. En effet, sur quoi basons-nous la sélection des informations qui nous parviennent à chaque instant ? Si votre téléphone sonne et que la porte de votre appartement s'ouvre au même moment, quelle information allez vous traiter en premier ? Vous pensez sans doute pouvoir tout gérer en même temps. Il n'en est rien. En effet, nous savons que nous ne pouvons traiter rapidement et efficacement deux informations à la fois (voir par exemple : Lemercier & Cellier, 2008). De même nous ne pouvons nous concentrer sur deux tâches simultanément (Pashler, 1992; Welford, 1952). Si nous voulons faire deux tâches simultanément, il est nécessaire qu'au moins l'une des deux tâches ait fait l'objet de processus d'automatisation et ne nécessite pas de ressources attentionnelles (Schneider & Shiffrin, 1977). C'est d'ailleurs l'une des fonctions principales de l'apprentissage procédural : l'automatisation d'une suite d'action à réaliser dans un ordre précis. C'est ce que nous faisons lorsque nous apprenons à jouer du piano par exemple. Nous apprenons des suites de notes qui correspondent à une suite de touche sur le clavier du piano. Lorsque nous apprenons une nouvelle partition, nous commençons toujours par une phase d'apprentissage plus ou moins longue selon son niveau qui demande beaucoup d'attention. Nous devons nous concentrer et nous utilisons beaucoup de ressources pour appuyer sur les bonnes touches au bon moment et avec la bonne main. Puis, au fur et à mesure de l'apprentissage, nous automatisons, nous gagnons en aisance, nous nous trompons moins souvent et nous avons moins besoin de nous concentrer. Nous commençons à apprécier ce que l'on joue et nous laissons même aller à plus de rapidité. Maintenant, imaginons ce même apprentissage en ajoutant au piano la capacité d'illuminer les touches du clavier. En faisant

cela, nous favorisons la sélection attentionnelle dans l'environnement du pianiste (le piano) et pouvons espérer réduire la durée d'apprentissage et libérer des ressources attentionnelles pour traiter d'autres informations tout aussi utiles comme lire les notes de la partition. Nous avons guidé l'attention du pianiste vers l'endroit de l'espace (les touches du clavier) où il devait effectuer son action. En d'autres termes, nous avons orienté son attention.

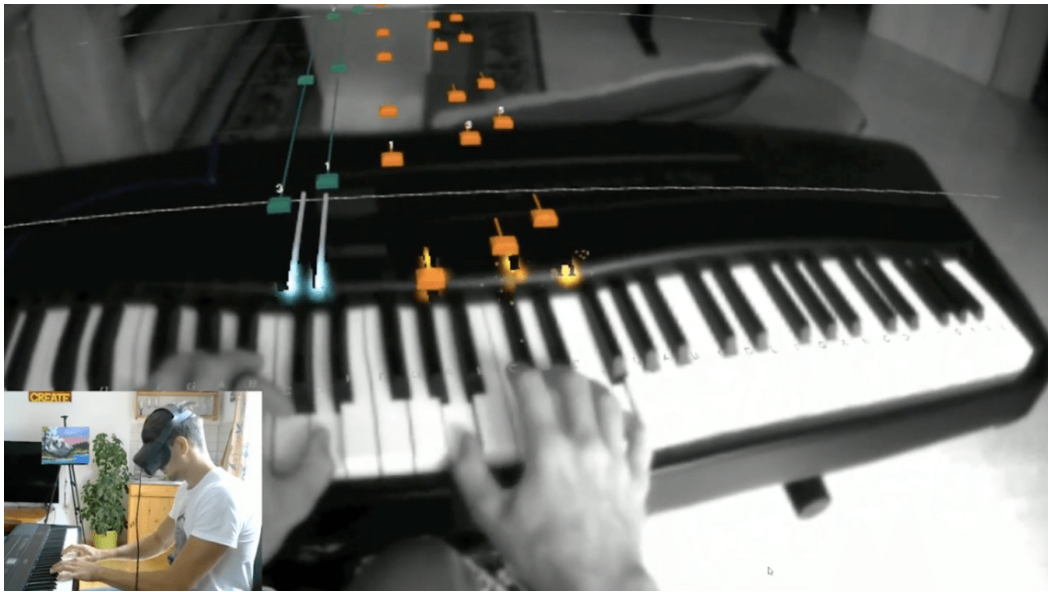


Figure 1.10. Application d'apprentissage de Piano en réalité augmentée : Magic Keys pour Oculus Quest (Image Credit: Dominik Hackl)

Les études sur l'orientation de l'attention peuvent permettre de créer des systèmes de guidage attentionnel destiné à favoriser la prise d'information dans l'environnement et à mieux orienter son attention vers les stimuli pertinents. Cependant, si le déplacement de l'attention a été étudié en sciences de l'ingénieur, elle l'a rarement été en faisant référence aux théories de Michael Posner. Elle se retrouve plutôt indirectement dans les études sur les systèmes de guidage destinés à attirer l'attention vers un objet ou une information spécifique

qui utilise préférentiellement des technologies d'eye-tracking comme mesure de l'attention des sujets. Ou encore dans les études effectuées sur la vision et le mouvement des yeux afin de déterminer des patterns de mouvement oculaire censé refléter des déplacements de l'attention. Ces études réduisent souvent l'attention au seul regard du sujet. N'oublions pas qu'un pattern visuel n'est pas exactement la même chose qu'un pattern attentionnel. L'on peut voir sans regarder, aussi bien que l'on puisse entendre sans écouter. Ainsi, de nombreuses recherches se sont intéressées au déplacement de l'attention des individus via l'étude de leurs mouvements oculaires. On sait ainsi que le mouvement des yeux dépend de l'intention du spectateur et de la tâche prescrite (Henderson & Hollingworth, 1998; Tatler, Wade, Kwan, Findlay, & Velichkovsky, 2010; Yarbus, 1967), mais aussi qu'il dépend du contenu de l'image. En effet, les humains vont naturellement focaliser leur regard sur les visages ou des régions informatives (Mackworth & Morandi, 1967). De plus, les yeux sont attirés automatiquement vers les forts contrastes locaux et les contours à haute densité. (DeCarlo & Santella, 2002; Grant & Spivey, 2003; Groen & Noyes, 2010; Mannan, Ruddock, & Wooding, 1996; Thomas & Lleras, 2007). Il est également possible de diriger le regard d'une manière plus subtile, via la technique SGD (Subtle Gaze Direction, R. Bailey, McNamara, Sudarsanam, & Grimm, 2009). C'est technique, développée par Reynold Bailey en 2009, consiste à introduire brièvement des indices de mouvement (modulation spatiale de l'image) dans la région périphérique du champ de vision. Le système visuel humain étant très sensible aux mouvements, ces brèves modulations fournissent d'excellents indices exogènes. Pour rendre cette technique subtile, les chercheurs ont présenté les indices uniquement aux régions périphériques du champ de vision (déterminé par suivi oculaire en temps réel). De plus, l'indice disparaît avant que le sujet puisse voir l'indice avec sa vision fovéale de haute acuité. Ainsi, il est possible grâce à cette technique de guider le mouvement des yeux des individus pour les guider vers l'emplacement souhaité.

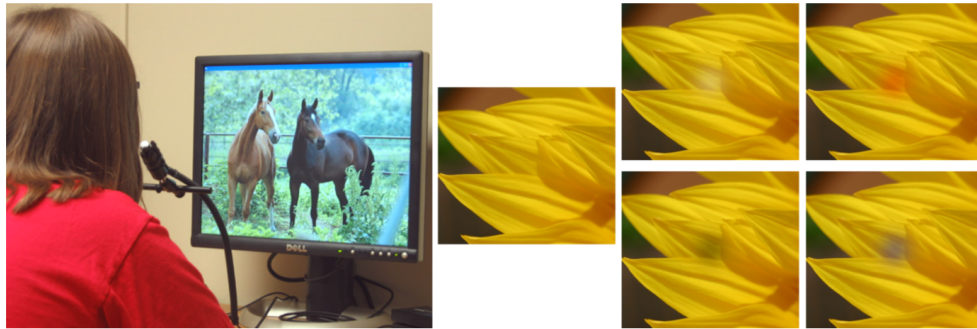


Figure 1.11. Photo de la configuration de l'expérience (à gauche). Extrait d'une image de test (au centre). Exemple de modulation de luminance (troisième colonne). Exemple de modulation chaud-froid (colonne de droite). (R. Bailey et al., 2009)

Afin de déterminer où la personne porte son attention, il est possible d'enregistrer le temps de fixation qui donne un indice de la focalisation attentionnelle du sujet. Ainsi, de nombreux chercheurs ont voulu comprendre et utiliser les séquences de fixations des experts pour guider les novices pendant l'entraînement. Ils se sont alors intéressés aux mouvements oculaires des experts dans des tâches spécifiques, par exemple, pour l'inspection des aéronefs (Ruble, Rabaud, Konolige, & Bradski, 2011). Litchfield et Ball (2011; 2010) ont montré que regarder le mouvement des yeux d'un expert pouvait aider à améliorer l'identification de nodules pulmonaires sur une radio aux rayons X de la poitrine d'un patient. La manipulation du regard a également été utilisée pour guider subtilement les novices le long d'un chemin visuel d'un expert en radiologie, lorsqu'il essayait d'identifier une anomalie sur une mammographie (Sridharan, Bailey, McNamara, & Grimm, 2012). Les résultats ont montré que les novices qui avaient été guidés obtiennent significativement de meilleures performances que le groupe contrôle. De plus, ils continuaient à avoir des performances supérieures même après la fin de l'entraînement sans manipulation du regard.

Booth (2014) part du constat que les deux défis principaux pour guider l'attention d'une personne sur un objet sont : déterminer ce à quoi la personne est en train de faire attention et fournir un indice visuel sur une autre partie de la scène pour diriger l'attention de la personne à cet endroit. Pour résoudre ce problème, il a utilisé des lunettes équipées d'eye-tracking et d'une caméra frontale qui capture la scène du point de vue du sujet et qui détermine la position du regard du spectateur. Ce que le sujet regarde peut-être déduit en extrayant les caractéristiques de l'image fournie par la caméra près de la fixation actuelle du spectateur et en recherchant la correspondance avec des objets connus. Cette technique détermine l'emplacement actuel de la fixation du sujet par rapport aux parties observables de la scène. Une fois le point de vue du sujet établi, un indice visuel (changement de luminance ou un flash) est projeté à un autre endroit de la scène pour attirer l'attention du sujet. Cette technique peut être utilisée autant de fois que nécessaire pour diriger l'attention du sujet au fil du temps.

Cette question du guidage de l'attention a également intéressé les chercheurs en cinéma, théâtre et photographie. Dans la plupart des cas les études reposaient sur une utilisation intelligente du contraste et de la composition, de lumière, ou de post-traitement manuel visant à mettre en évidence des objets ou des personnages d'intérêts. Plusieurs systèmes de réalités augmentées ont également été développés afin de mettre en surbrillance directement les objets du monde réel (Wellner & Freeman, 1993; ?; ?; ?) ou des objets sur des vidéos du monde réel (Chastine, Nagel, Zhu, & Hudachek-Buswell, 2008; Gauglitz, Lee, Turk, & Höllerer, 2012). Veas, Mendez, Feiner, and Schmalstieg (2011) ont, quant à eux, utilisé du prétraitement vidéo afin d'augmenter la saillance de la région d'intérêt et réduire la saillance des régions autour de la région d'intérêt. Pour cela, ils ont ajusté le contraste de différentes zones de la vidéo, afin de créer un changement naturel (très subtile et indétectable) qui augmente la probabilité que les régions cibles soient traitées.

Si la littérature sur le "guidage de l'attention" est florissante, notamment par l'étude du mouvement des yeux, aucune étude ne semble l'avoir fait sous l'angle des théories de Michael Posner. La majorité n'étudie pas directement les processus attentionnels et les rares études qui mentionnent l'"attention" la décrivent partiellement sans réelle référence théorique. Plus encore, aucune ne s'est intéressée aux propriétés couvertes de l'attention dans cet objectif de guidage. Cependant, ces études nous montrent qu'il est possible de créer des systèmes de guidage efficaces afin d'aider les individus lors de la réalisation de tâche complexe. Un guidage efficient peut s'avérer particulièrement efficace, lorsque l'environnement est composé de nombreux instruments, parfois difficile à distinguer les uns des autres sur de simples caractéristiques physiques, comme le sont les cockpits d'avion, les tours de contrôle aériennes, les stations spatiales ou les blocs opératoires. De plus, ces environnements impliquent le suivi rigoureux de procédures de sécurité qui doit être réalisé précisément et sans erreurs afin de garantir la sécurité de tous. Un guidage efficace de l'attention dans ce type de situation pourrait permettre d'aider les pilotes, contrôleur et chirurgien dans leur pratique, en facilitant la recherche et la prise d'informations dans l'environnement. Ce guidage pourrait leur permettre d'agir rapidement et efficacement, notamment dans les situations d'urgence où quelques millisecondes de traitement peuvent faire la différence. L'on peut supposer qu'utiliser les propriétés couvertes de l'attention dans des systèmes de guidages pourrait être plus efficient, dans certaines situations, qu'en utilisant ces propriétés ouvertes. En effet, les moments où un guidage de l'attention peut s'avérer capitale, sont ceux où la personne est déjà focalisée sur une information. Elle utilise donc déjà son orientation ouverte pour traiter l'information sur laquelle elle porte son attention. Comme on peut le voir dans les phénomènes de tunnelisation par exemple. Il est donc fort probable que lorsqu'une stimulation visuelle est fournie au participant à ce moment-là, elle soit traitée par des processus d'attention couverte et non par des processus d'attention ouverte.

Étudier le guidage de l'attention au regard des théories de Posner sur l'attention couverte peut nous renseigner sur les stimulations visuelles les plus efficaces pour guider l'attention dans ce genre de situation. Nous discuterons de ce point plus en détail à la fin de cette thèse (section 4.2) en nous basant sur les résultats de nos expériences.

Quel type d'indice choisir pour guider efficacement ?

Utilisé à l'origine pour explorer les mécanismes d'orientation de l'attention, le paradigme de Posner permet également de déterminer l'efficacité des indices à orienter l'attention. En effet, en soustrayant les temps de réponse entre les indices valides et non valides, nous obtenons un "effet de validité" qui reflète la capacité de l'indice à diriger l'attention dans l'espace et donc à améliorer la précision et la rapidité du traitement des informations à cet endroit. Des temps de réponse similaires entre les indices valides et non valides (pas d'effet de validité) indiquent que l'indice est inefficace. Des réponses plus rapides aux cibles indicées (effet de validité positif) indiquent que l'indication est efficace. Enfin, des réponses plus rapides en réponse à un indice non valide (effet de validité négatif) indiquent une « inhibition de retour » et donc un coût de traitement supplémentaire : dans ce cas, l'indice est inefficace. Comme nous l'avons vu de nombreuses variables vont influencer l'efficacité des indices et la balance coût/bénéfice, il n'y a donc pas de réponse simple au type d'indice à utiliser pour orienter efficacement l'attention des individus. Les études sur le guidage de l'attention ayant été effectuée sans référence aux théories de Posner sur l'orientation de l'attention. Nous ignorons aujourd'hui encore, quelles sont les facteurs permettant une orientation optimale dans une visée applicative. Si les études en sciences de l'ingénieur, sont d'un grand intérêt et apportent des éléments de réponses quant à la manière de guider l'attention d'une personne dans différents environnements et au cours de différentes tâches, nous pensons qu'étudier ce

guidage au regard des théories sur l'orientation de l'attention établit en psychologie cognitive peut permettre d'identifier les variables qui pourraient permettre le guidage le plus efficace possible, en fonction des buts rechercher.

1.2.5 En résumé

L'attention est limitée. C'est un ensemble de mécanismes cognitifs fondamentaux responsable de la sélection de l'information, de la gestion de ces informations et de la gestion des ressources investies dans une tâche. L'attention a des propriétés sélectives et lorsque nous traitons des informations, nous devons sélectionner les informations pertinentes et ignorer les informations distractives durant l'activité en cours afin d'effectuer un traitement approfondi (par exemple, extraire les caractéristiques physiques de l'objet : forme, couleur, nombre de côtés, etc.). Dans le domaine visuospatial, il s'agit de sélectionner une région de l'espace visuelle qui ferait l'objet d'un traitement privilégié durant la tâche en cours. Cette sélection peut s'accompagner de mouvements oculaires ou être effectuée sans déplacement du regard (explicite/implicite). L'on peut mesurer ces effets à l'aide du paradigme de Posner qui consiste à utiliser un indice perceptif de type flash lumineux ou indication symbolique afin d'orienter l'attention des individus vers une région de l'espace ou une information à traiter (une couleur par exemple) va apparaître. On mesure alors le temps d'identification de l'information cible (la couleur) en demandant aux participants de répondre le plus rapidement possible, en appuyant sur un bouton, lorsqu'il a réussi à identifier la cible. Les temps de réponse seront impactés en fonction de la validité de l'indice (valide/invalid), du type d'indice (endogène = volontaire /exogène = automatique), de la prédictivité de l'indice (prédictif/non prédictif), de son temps de présentation (subliminale, liminale), de l'intervalle de temps entre l'indice et la cible (SOA ou ISI), de la modalité de l'indice (visuelle/auditif/haptique) ou encore de sa position dans l'espace. Il est donc important de contrôler toutes ces variables lors de

la conception des protocoles expérimentaux. L'identification des variables qui impactent le paradigme de Posner peuvent permettre de fournir des conseils ergonomiques pour la conception de systèmes d'alarme et de guidage attentionnel notamment dans les situations où l'individu doit réagir rapidement et efficacement. Comme c'est souvent le cas dans les situations de pilotages, de contrôle, d'opération de maintenance ou d'intervention médicale.

1.3 La Réalité virtuelle

"La puissance de la réalité virtuelle réside dans sa capacité à s'adresser au sens, à donner à voir et même à explorer, un monde imaginaire doté des lois et des règles qui ont été implémentées"

— Bernard Jolivald Jolivald, 1995

La réalité virtuelle est née de l'alliance entre l'informatique, l'optique et la robotique. C'est une technologie qui permet d'immerger un individu dans un monde virtuel avec lequel il va pouvoir agir en temps réel de manière réaliste. Elle ajoute à l'environnement dans lequel nous évoluons, un espace qui se superpose au réel sans jamais interférer avec lui. (Jolivald, 1995). Elle se différencie des autres environnements virtuels par le fait que l'utilisateur est au centre de l'environnement qui se crée autour de lui. Si l'ordinateur ou la console de jeu laisse l'utilisateur à l'extérieur, la réalité virtuelle le place à l'intérieur. L'utilisateur agit avec son corps à l'intérieur d'une réplique plus ou moins réaliste du monde réel et bénéficie d'une vision totale sur le monde qui l'entoure. Il est en immersion dans un monde virtuel. Cet environnement virtuel si particulier est un outil aux possibilités infinies dans l'étude de la cognition et du comportement humain. En permettant la création de monde imaginaire aussi bien que réel, qui peut être régi par des lois de physiques réalistes ou plus audacieuses, la réalité virtuelle offre une nouvelle manière d'étudier la cognition humaine. Il est ainsi possible d'explorer le comportement humain et les processus cognitifs associés dans des conditions risquées, dangereuses, rares ou coûteuses, autrement difficiles à mettre en place en environnement réel. L'espace ou l'aéronautique en sont sans doute le meilleur exemple. En effet, évoluer dans la station spatiale ou conduire un avion, par exemple, sont des situations qui demandent un entraînement rigoureux, souvent très coûteux et qui présente des risques. La réalité virtuelle offre ainsi une alternative à moindre coût répétable à l'infini et sans danger

pour les individus.

De nos jours, les technologies de réalité virtuelle sont en plein essor. Grâce à la baisse des coûts de production et à l'amélioration des affichages et de l'interaction, les casques de réalité virtuelle sont de plus en plus populaires chaque jour. Ces technologies sont particulièrement utilisées pour la formation et sont souvent présentées comme une révolution majeure dans le domaine de l'apprentissage. La société Walmart par exemple, géant de la distribution américaine, a déjà formés plus d'un million de personnes au service client, grâce à la réalité virtuelle. La société UPS également, forme ses livreurs via un apprentissage immersif, pour les exposer au danger de la route afin de mieux s'y adapter. Les recherches sur l'apprentissage et la formation en réalité virtuelle sont nombreuses (Amokrane, 2010; Barre, Benabbou, Corneloup, Bourrier, & Job, 2017; d'Huart, 2001; Roy, 2016). Mais, si la réalité virtuelle est un domaine de recherche qui intéresse de plus en plus les chercheurs. La plupart des études pionnières dans ce domaine datent de la première *hype* de la réalité virtuelle des années 1990. Et il faudra attendre les années 2015 avec la nouvelle *hype* de la réalité virtuelle et les avancés technologiques réalisées qui ont fait baisser ces coûts de production et qui l'ont rendu plus accessible pour que les recherches s'intensifient. De ce fait, aujourd'hui encore, de nombreux paradigmes expérimentaux utilisés en sciences de la cognition n'ont toujours pas fait l'objet d'étude en réalité virtuelle. D'aucun penseront que ce n'est pas toujours nécessaire, et que les études en laboratoires sont suffisantes. Cependant, les perspectives nouvelles qu'offrent la réalité virtuelle dans la conception de nouveaux paradigmes expérimentaux et dans la modification et l'amélioration des paradigmes existants ne devraient pas être sous-estimées.

Premièrement, l'une des caractéristiques qui font la puissance de la réalité virtuelle est qu'elle permet de développer des environnements complexes entièrement configurables et contrôlables. Elle permet l'enregistrement précis de réponses ciblées (Larson, Feigon, Gagliardo, & Dvorkin, 2014), et offre ainsi un environnement expérimental d'étude de la

cognition qui permet un contrôle rigoureux indispensable à toute recherche expérimentale. Contrôle qui s'avère très important dans l'étude des processus d'orientation attentionnelle, qui sont des processus de traitement extrêmement rapides qui se produisent plusieurs fois par seconde. La réalité virtuelle s'avère également plus intéressante lorsqu'il s'agit d'étudier les comportements dans des situations naturelles, proches des situations qu'un individu peut rencontrer au quotidien. Grâce à sa capacité à reproduire un environnement virtuel pseudo-naturel, majoritairement basé sur de l'information visuelle et auditive, la réalité virtuelle est un outil très intéressant dans l'étude du traitement des informations visuospatiales, en particulier, en comparaison à des configurations standards (écran, clavier, souris). En effet, la majorité des études menées en laboratoire utilisent des environnements relativement simples sur ordinateur de bureau (par exemple, De Schotten et al., 2011; Greenwood, Parasuraman, & Haxby, 1993; Wang, Wu, Fu, & Luo, 2010). Ces conditions sont parfois qualifiées de synthétiques, car ce sont des conditions qui s'éloignent des conditions réelles dans lesquels les individus élaborent leurs comportements. On dit que ce sont des environnements qui manquent de validité écologique. Au contraire, en réalité virtuelle, un utilisateur muni de contrôleur virtuel ou de gants destinés à reproduire les gestes et mouvements de sa main dans le monde virtuel pourra agir dans ce monde et y effectuer des actions semblables à celles qu'il peut effectuer au quotidien. Il ressentira en retour un sentiment de présence, c'est-à-dire le sentiment d'exister dans un monde en dehors du monde physique qui l'entoure. La réalité virtuelle permet donc, tout en gardant l'avantage du contrôle d'un environnement expérimental de laboratoire, de plonger l'utilisateur dans un environnement virtuel pseudo-naturel plus écologique, plus proche des conditions réelles d'élaboration des comportements.

Deuxièmement, la vision stéréoscopique en trois dimensions et les degrés de liberté de mouvement qu'offre la réalité virtuelle en font un outil très intéressant, dans l'étude des processus d'attention visuelle. En effet, en réalité virtuelle, l'utilisateur est libre de se déplacer

et de regarder où il souhaite pendant que l'image qui lui est fournie s'adapte en temps réel. Cette différenciation notable avec les environnements standards d'expérimentation, élargie le champ d'exploration de nos processus cognitifs. Par exemple en réalité virtuelle, le champ visuel s'étend au-delà des informations perçues par les yeux à un moment donné, l'utilisateur évoluant dans un environnement virtuel à 360°. Il existe ainsi une distinction fondamentale, souvent négligée dans l'étude de la vision, le *Field of view* (FOV) et le *Field of Regard* (FOR). Le FOV correspond à la taille du champ visuel en degrés qui peut être vu instantanément (Bowman & McMahan, 2007). Tandis que le FOR correspond à la surface totale qui peut être vue en tournant la tête et bougeant le corps (Clark, 2013). Le FOR a été négligé dans les études sur la perception humaine. Pourtant, il est important dans le monde réel, car nous bougeons constamment notre tête et notre corps pour explorer notre environnement et élaborer nos comportements. (W. Jang, Shin, Kim, & Kim, 2016). Le FOR a été si souvent négligé qu'aucune définition issue des sciences cognitives ne semble exister. La notion de FOR étant utilisée au départ en sciences de l'ingénieur pour décrire les systèmes de senseur mobile capable de se mouvoir afin de réceptionner l'information à un endroit précis tels que le sont les radars, les caméras de surveillance ou les télescopes. Cette distinction peut pourtant être intéressante dans l'exploration des processus d'orientation de l'attention qui s'étendent très probablement au-delà du FOV. Nous savons par exemple que les processus d'orientation de l'attention au niveau auditif se déploient à 360°. L'audition possédant naturellement un champ perceptif de 360°, équivalent à un FOR de 360° pour la vision. Il est possible que les processus d'attention visuelle possèdent une capacité à se déployer dans la totalité du FOR. Aujourd'hui encore, nous ignorons quel processus cognitif entre en jeu lorsque nous devons orienter notre attention visuelle au-delà du FOV, et donc dans le FOR, ni si ces processus diffèrent ou non des processus observés dans le FOV.

En résumé, en proposant un environnement virtuel immersif dans lequel les individus

peuvent agir de manière pseudo-naturelle. La réalité virtuelle permet de gagner en validité écologique en recherche expérimentale et nous rappelle l'importance de considérer la totalité du champ de regard (FOR) des sujets dans l'étude de la perception visuelle. Ces deux différences majeures avec un environnement d'expérimentation standard sur ordinateur de bureau font de la réalité virtuelle un outil de choix dans l'étude de l'orientation de l'attention. Nous discuterons plus en détail de ces particularités dans la section 1.3.2.1 et 1.3.2.2. Mais, voyons tout d'abord ce que sont les technologies de réalité virtuelle.

1.3.1 Les technologies de réalité virtuelle

Aujourd'hui la plupart des gens connaissent la réalité virtuelle et sont capables de donner un sens à cet oxymore. Mais, la réalité virtuelle est un champ de recherche multidisciplinaire dont de nombreuses définitions existent selon les domaines et qui ont évolué au fil du temps. Les médias s'étant emparés du phénomène, ils ont également participé à une certaine généralisation du terme de réalité virtuelle qui est associé pour le grand public à des technologies qui ne sont pas toujours qualifiées de réalités virtuelles pour les chercheurs du domaine. Dans cette thèse, nous avons choisi de nous baser sur le traité de réalité virtuelle de Fuchs, 2006. D'après Fuchs, « la réalité virtuelle a pour finalité de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensorimotrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel. C'est-à-dire de mener une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde créé numériquement. Une interface de réalité virtuelle doit donc non seulement comporter une dimension sensorielle (visuelle, auditive, haptique, cinesthésique, etc.), mais également proposer une interaction motrice dans ce monde ainsi simulé ». De ce fait, le visionnage de vidéo à 360° ou de film en 3D souvent qualifiés de réalité virtuelle n'en fait pas partie, car les utilisateurs restent passifs et n'interagissent pas.

Il est alors possible de distinguer deux principales interfaces de réalités virtuelles :

1. **Les salles immersives sphériques ou cubiques de type CAVE** (Cave Automatic Virtual Environment) ou Icube. Dans ces salles, l'utilisateur est placé dans une pièce et des images, qui sont projetées sur des murs, le sol et/ou le plafond, s'adaptent au point de vue de l'observateur via un système de capture de position (figure 1.12). L'utilisateur peut interagir avec l'environnement virtuel via des contrôleurs (manette) ou par des systèmes de capture de position des mains en temps réel, par exemple.



Figure 1.12. Salles immersives cubiques de type CAVE

2. **Les casques de réalité virtuelle ou visiocasques** qui stimulent le système visuel et localisent l'orientation et/ou la position de la tête du porteur pour adapter l'information

visuelle en conséquence (figure 1.13). Des contrôleurs, des gants ou d'autres systèmes de capture de position permettent à l'utilisateur d'interagir avec le monde virtuel.



Figure 1.13. Casque de réalité virtuelle HTC VIVE

Dans cette thèse, nous avons choisi d'utiliser un casque de réalité virtuelle (ou visiocasque) pour nos recherches. Il a l'avantage d'être moins coûteux que les systèmes de type CAVE et propose un environnement de réalité virtuelle plus immersif que son confrère. De plus, il s'est avéré plus efficace dans de nombreuses tâches cognitives.

HTC VIVE

Le casque de réalité virtuelle que nous avons utilisé dans nos expériences est un HTC Vive de première génération (figure 1.13). Un eye-tracker a été intégré à ce casque qui n'en possède pas d'origine et qui permet de suivre les déplacements oculaires des utilisateurs ou

mesurer des temps de fixation, par exemple. Le domaine de la réalité virtuelle étant en plein essor, nombreux sont aujourd'hui les casques qui en possèdent un. Néanmoins, les recherches qui associent réalité virtuelle et eye-tracking n'en sont encore qu'à leur balbutiement.

1.3.2 Sciences cognitives et réalité virtuelle

Les connaissances en sciences cognitives associées aux nouvelles technologies offrent un horizon d'étude prometteur dans l'étude de l'attention. L'une de ces technologies, la réalité virtuelle, permet à un individu d'évoluer en immersion dans un monde artificiel parfaitement contrôlé. Si, elle a fait rêver beaucoup de personnes dans les années 90, elle n'a pas su conquérir le grand public. Aujourd'hui encore, elle a du mal à vraiment se démocratiser, même si de nouveaux casques sont régulièrement commercialisés. Elle est donc encore majoritairement utilisée dans le cadre professionnel. Néanmoins, elle a toujours intéressé la recherche pour l'intérêt qu'elle apporte dans l'étude de nos capacités cognitives. Elle a la particularité d'être un outil de recherche, autant qu'un objet de recherche elle-même, du fait que c'est un environnement virtuel qui met en œuvre des situations perceptives et cognitives inédites (Burkhardt, 2003b).

La réalité virtuelle est un environnement virtuel interactif visant à permettre à un ou plusieurs utilisateurs d'évoluer dans une simulation numérique dans laquelle elle pourra interagir avec des objets en trois dimensions plus ou moins réalistes. Fuchs, Moreau, and Berthoz (2003) parlent à ce propos d'interfaces comportementales visant à exploiter un comportement humain, naturel et sans acquis préalables. Souvent présentée comme l'aboutissement ultime des interfaces de manipulation directe, cette technologie affiche l'ambition de faire " disparaître " l'interface afin de redonner un mode d'interaction " naturel " aux utilisateurs (Burkhardt, 2007).

Dans cette thèse la réalité virtuelle sera utilisée comme un outil de recherche dans la

compréhension des mécanismes d'orientation de l'attention en environnement écologique. La réalité virtuelle est, parmi les environnements virtuels, celui qui présente la plus grande capacité d'immersion et de présence. En effet, les environnements virtuels sont classifiés selon 3 dimensions clefs : l'immersion, la présence et le réalisme. L'immersion correspond au nombre de canaux sensoriels stimulés et à leur fidélité, c'est-à-dire leur propension à simuler une perception naturelle. La présence correspond au sentiment subjectif d'exister en dehors du monde physique qui nous entoure et le réalisme à la qualité graphique et interactive du système. Si la réalité virtuelle est plus écologique qu'un environnement numérique classique, c'est grâce au sentiment de présence, la sensation « d'être là »(Maneuvrier Hervieu, 2020). Cette dimension écologique de la réalité virtuelle est l'un des premiers avantages de la réalité virtuelle en sciences cognitives, qui sera développé dans le paragraphe suivant (1.3.2.1).

De plus, si lors de passation sur ordinateur l'utilisateur est spectateur de l'environnement virtuel avec lequel il va pouvoir interagir de "l'extérieur". En réalité virtuelle l'utilisateur est acteur du contenu. Il est plongé à l'intérieur de l'environnement virtuel et évolue dans le monde virtuel à la première personne. Il peut se déplacer et regarder tout autour de lui. Cette caractéristique qui est le premier défi de tout concepteur en réalité virtuelle offre la possibilité d'étudier la perception, dans ce que nous appellerons "un champ perceptif étendu" en comparaison à un environnement traditionnel de laboratoire. Ce champ perceptif étendu ouvre la porte à l'étude de facteur qui ne peuvent pas ou difficilement être mis en œuvre en laboratoire, notamment dans la cadre de l'orientation de l'attention (voir section suivante 1.3.2.1). Dans une perspective applicative, la réalité virtuelle sera pensée comme un outil d'aide à la formation et nous aborderons le guidage de l'attention en réalité virtuelle en prenant comme exemple l'aide à l'apprentissage de procédure via un guidage attentionnel.

1.3.2.1 Un environnement transformé

La réalité virtuelle est une technologie ambitieuse qui se propose de plonger l'utilisateur dans l'environnement virtuel et de troquer sa place de spectateur pour celui d'acteur. C'est le premier défi de tout ingénieur en réalité virtuelle, mais aussi une des qualités premières de la réalité virtuelle en tant qu'outil de recherche en sciences cognitives. La personne n'est plus passive devant un écran d'ordinateur, mais active dans un monde virtuel où elle peut agir de manière pseudo-naturelle. Elle perçoit l'environnement en trois dimensions avec des effets de profondeur et de parallaxes et peut se déplacer dans cet environnement. Elle effectue une classique boucle perception-décision-action dans un environnement virtuel (voir figure 1.14).

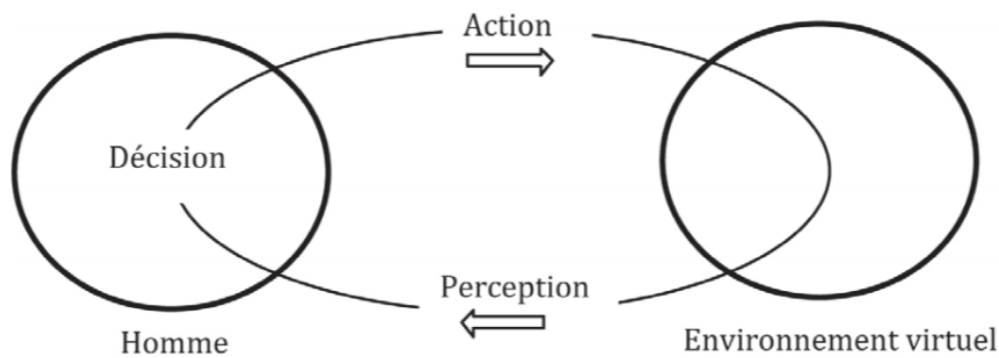


Figure 1.14. Boucle "perception, décision, action" de Fuchs, 2016

Les interactions que les sujets effectuent en réalité virtuelle sont donc souvent plus naturelles que lors de l'utilisation d'interfaces classiques telles qu'un écran, un clavier et une souris. En effet, en réalité virtuelle, la personne peut naturellement faire appel à des automatismes tels que des schèmes d'action qu'il a acquis dans le monde réel lorsqu'il effectue des actions dans le monde virtuel. Un schème d'action étant défini comme l'organisation mentale des actions, transférable et généralisable, lors de la répétition d'une

action dans des circonstances similaires. Piaget disait : « Nous appellerons schèmes d'actions, ce qui dans une action, est aussi transposable, généralisable ou différenciable d'une situation à la suivante, autrement dit ce qu'il y a de commun aux diverses répétitions ou applications de la même action. » (Piaget, 1966). Ces schèmes nous permettent d'assimiler les situations et les objets auxquels l'on est confronté dans le monde virtuel en transférant nos acquis du monde réel au monde virtuel. Il est même possible de créer de nouveaux schèmes d'action en réalité virtuelle qui pourront être transférés dans la vie réelle.

Nous l'avons vue, de par ces aspects immersifs et interactifs, la réalité virtuelle augmente la validité écologique des paradigmes expérimentaux utilisés en sciences de la cognition. Mais elle implique des changements perceptifs et cognitifs qui ne sont pas sans conséquence. En effet, nous savons que les expériences effectuées en environnement immersif tridimensionnel (3D) peuvent différer des expériences dans lesquelles les stimuli sont présentés sur un écran d'ordinateur en 2D. Par exemple, dans une étude sur le rôle de la mémoire dans l'allocation de l'attention (Li, Aivar, Kit, Tong, & Hayhoe, 2016), les auteurs ont cherché à comparer les différences qui pouvait exister dans une tâche de recherche d'objet entre une expérience immersive en trois dimensions et une expérience sur écran d'ordinateur en deux dimensions. Ils ont constaté une plus grande utilisation de la mémoire spatiale en réalité virtuelle plutôt que sur écran d'ordinateur. Une étude a même montré de meilleures performances (rapidité et précision) lors d'une tâche de recherche visuelle en environnement immersif comparé à la même tâche en 2D (Figueroa, 2018). Néanmoins, certaines études montrent des résultats similaires pour les paradigmes en 2D et leurs adaptations en réalité virtuelle (voir par exemple, Foerster, Poth, Behler, Botsch, & Schneider, 2016; Kit et al., 2014).

Le paradigme de Posner étant principalement investigué en condition de laboratoire sur écran d'ordinateur standard, nous ignorons aujourd'hui s'il peut franchir ses portes afin d'être utilisé pour des recherches appliquées et pour l'étude de l'orientation de l'attention

en environnement écologique. La réalité virtuelle peut permettre de construire un pont entre les conditions souvent très synthétiques d'un environnement de laboratoire vers un environnement qui gagne en validité écologique (Olk, Dinu, Zielinski, & Kopper, 2018). Mais comme nous l'avons vu, le paradigme de Posner est sensible à la variation de nombreux facteurs tels que la tâche effectuée (détection, discrimination) ou la modalité perceptive utilisée pour indiquer les sujets. La question se pose donc de savoir si l'on peut transférer le paradigme de Posner en réalité virtuelle lorsque les sujets doivent effectuer des actions concrètes sur des objets virtuels. Constaterons-nous les mêmes effets de validité que sur écran d'ordinateur ? Si oui, ces effets sont-ils sensibles aux mêmes facteurs ? Ces questions seront abordées dans la première partie de la thèse (2.1).

1.3.2.2 Un champ perceptif étendu

Comme nous l'avons vu, lorsqu'un individu évolue dans un système de réalité virtuelle, il est libre de se déplacer et de regarder autour de lui. S'il peut uniquement bouger la tête, il possède alors trois degrés de liberté (*Degree of freedom* = Dof). C'est-à-dire qu'il peut bouger la tête de haut en bas, de droite à gauche et d'avant en arrière (voir figure 1.15). Dans les interfaces où l'utilisateur peut aussi se déplacer, il possède trois degrés de liberté supplémentaire (6dof). Il peut alors se déplacer vers l'avant, l'arrière, la gauche, la droite, le haut et le bas (voir figure 1.16).

Contrairement aux interfaces standards de type-écran d'ordinateur. La réalité virtuelle étend donc le champ perceptif des sujets qui ne sont plus simplement statiques devant un écran placé devant eux. S'il est possible de réaliser des expériences en réalité virtuelle sans impliquer de changement de point de vue. Les changements possibles que proposent les degrés de liberté de la réalité virtuelle nous amène à considérer le traitement de l'information lorsque l'information que nous avons à traiter ne se situe pas uniquement dans l'espace

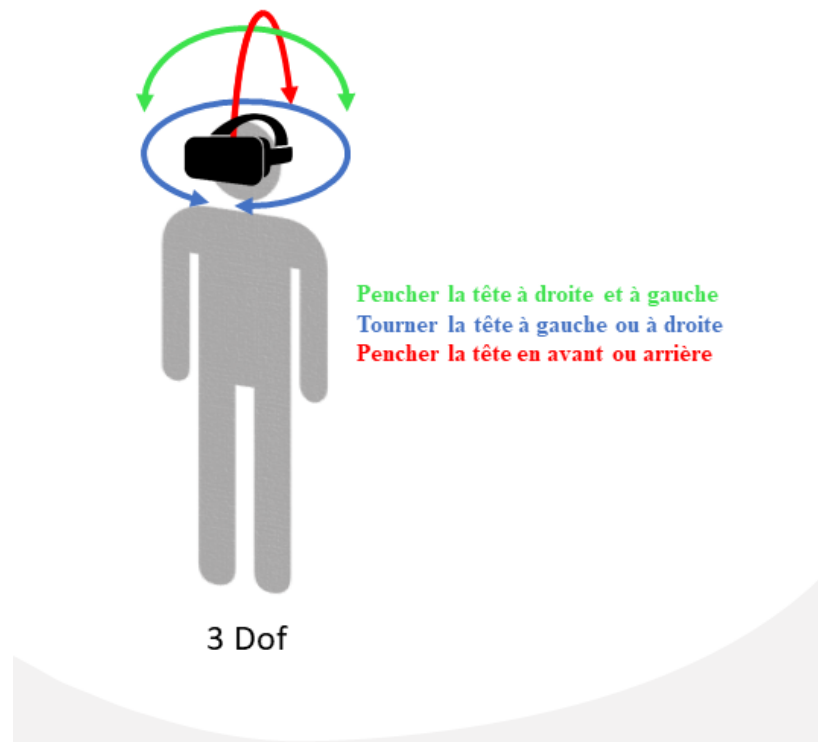


Figure 1.15. 3 Degrés de liberté de mouvement en réalité virtuelle

visuel directement perçu devant nous. Et plus particulièrement, lorsque l'information à traiter apparaît derrière nous. Nous pouvons alors nous demander, s'il était possible d'orienter l'attention d'une personne vers un endroit de son champ visuel n'ont directement perçu devant lui, mais pour lequel il devra effectuer un déplacement de la tête et/ou du corps afin de traiter la nouvelle information. Par exemple, pour avertir un automobiliste de faire attention à une voiture qui arrive trop vite derrière lui.

Nous utilisons nos sens pour construire une représentation du monde. Dans la vision, nous utilisons l'information bidimensionnelle reçue par chaque œil, devant nous (Hodgson & Muller, 1999), puis nous ajoutons la profondeur (Chen et al., 2012) jusqu'à l'intégration

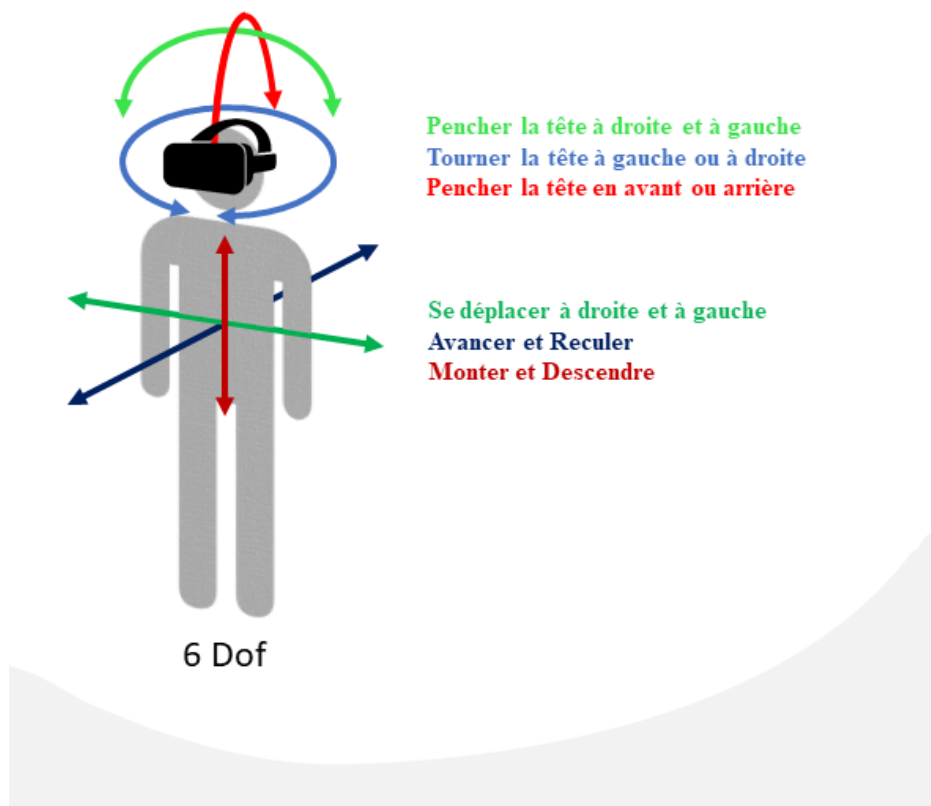


Figure 1.16. 6 Degrés de liberté de mouvement en réalité virtuelle

multisensorielle dans l'espace péripersonnel et extrapersonnel (Van der Stoep, Nijboer, Van der Stigchel, & Spence, 2015). L'espace peripersonnel étant l'espace où l'on peut agir sans se déplacer, tandis que l'espace extrapersonnel correspond à l'espace au-delà de l'espace d'action directe. On sait par exemple que les processus d'orientation couverte ne se déploient pas de la même façon dans ces deux espaces (e.g. Losier & Klein, 2004). Cependant, les connaissances théoriques en matière d'orientation attentionnelle au-delà de l'espace frontal font encore défaut. Il a longtemps été supposé de manière implicite que les processus d'orientation de l'attention dans l'espace avant étaient généralisables à l'espace

arrière. Cependant, comme nous n'avons pas d'oeil derrière la tête, fournir des indices visuels dans l'espace arrière est impossible sans se retourner. De ce fait, l'intégration multisensorielle est exclusivement étudiée dans les modalités audiotactiles (Occelli, Spence, & Zampini, 2011; Zampini, Torresan, Spence, & Murray, 2007), l'audition et le toucher possédant naturellement un champ perceptif direct de 360°. Néanmoins, il est possible d'avoir une représentation visuelle interne d'un objet situé derrière nous sans retour visuel. Comme c'est le cas pour la représentation interne des informations auditives (Aggius-Vella et al., 2020; Delogu & McMurray, 2019. La mémoire de travail (mémoire temporaire qui permet de stocker les informations à traiter lors de l'activité en cours) nous permet d'avoir une représentation multisensorielle stable de l'espace qui nous entoure. L'orientation attentionnelle et la mémoire de travail visuelle sont des mécanismes complexes imbriqués et on sait qu'il est possible de diriger l'attention spatiale vers des représentations internes (Lepsien, Griffin, Devlin, & Nobre, 2005). Cette orientation attentionnelle interne facilite la recherche au sein de la mémoire de travail. Nous pensons que ce mécanisme pourrait également expliquer la conscience de la situation dans l'espace arrière et les mécanismes d'orientation spatiale vers des informations "cachées" derrière nous. Mais l'étude de l'orientation attentionnelle visuelle dans l'espace arrière se heurte à des contraintes méthodologiques évidentes : impossibilité de fournir des indices visuels dans l'espace arrière ou de présenter des cibles visuelles sans introduire des mouvements de la tête et du corps. Il existe malgré tout quelques exemples de recherche abordant cette question dans l'étude de l'orientation cross-modale (visuelle/auditif). Par exemple, Ho and Spence (2005) ont utilisé des indices auditifs (signaux d'avertissement ou indications verbales) et des cibles visuelles pour orienter l'attention d'automobilistes. Les informations relatives à l'espace arrière étaient visibles à travers un rétroviseur placé devant le conducteur et celles relatives à l'avant à travers le pare-brise. Toutes les cibles étaient donc présentées dans l'espace frontal. Les résultats ont montré des temps de réponse plus

rapide lorsque la cible apparaît à travers le pare-brise plutôt qu'à travers le rétroviseur. Ceci, malgré le fait que les cibles étaient identiques d'un point de vue perceptif. Ces résultats suggèrent donc une différence de traitement lorsqu'une information est associée ou non à une autre information située derrière les sujets. Cependant, J. Lee and Spence (2015) ont obtenu des résultats différents en utilisant le "paradigme d'indication orthogonal", un paradigme semblable au paradigme de Posner. Ils ont utilisé des indices auditifs spatialisés et des cibles frontales latéralisées (gauche ou droite). Les résultats ont indiqué un avantage de traitement lorsque l'indice prédit la position latérale (gauche/droite) indépendamment de sa localisation transversale (avant/arrière). Les auteurs ont suggéré que les indices auditifs n'attiraient pas nécessairement l'attention sur l'emplacement de la cible, mais plutôt sur un champ visuel spécifique (gauche/droite). Cependant, dans leur étude, la cible ne pouvait apparaître que devant les sujets. Par conséquent, l'emplacement spatial transversal de l'indice (avant/arrière) n'est pas pertinent pour la tâche et pourrait avoir été ignoré par les participants. Aujourd'hui, on ignore donc encore le fonctionnement des mécanismes d'orientation de l'attention couverte lors de déplacement hors du champ visuel, en particulier dans l'espace arrière. Nous savons qu'il existe des différences dans l'interaction intermodale entre les espaces avant et arrière pour les indices auditifs (voir Spence, Lee, & Van der Stoep, 2017), mais de nombreuses questions demeurent. La difficulté méthodologique réside dans le fait qu'il est difficile de présenter des indices visuels associés à des objets réels dans l'espace arrière. Nous proposons d'aborder cette problématique dans la deuxième partie de cette thèse en étudiant l'orientation de l'attention à 360° (3.5).

1.3.3 Un outil de recherche et de formation

""Si tu me le dis, je vais écouter, si tu me le montres, je vais le voir. Mais si tu me permets d'en faire l'expérience, je vais apprendre."

Les principaux domaines d'utilisation de la réalité virtuelle sont la formation, la recherche et le clinique (Malbos, Boyer, & Lançon, 2013). L'une des premières raisons étant une plus grande motivation des apprenants, des participants ou des patients. Les utilisateurs de la réalité virtuelle rapportent souvent un fort degré d'engagement envers les contenus immersifs (Harrington et al., 2018). La réalité virtuelle est une technologie en vogue, mais pas encore vraiment démocratisée. De ce fait, nombreuses sont les personnes qui aimeraient tester la réalité virtuelle. Les participants volontaires pour participer aux études réalisées en réalité virtuelle sont donc souvent très motivés. Motivation au combien essentiel lorsque l'on travaille sur l'attention ! Dans un objectif de formation, elle permet de simuler dans des conditions proches du réel des situations rarement répétables ou difficiles à mettre en oeuvre en environnement réel, comme pour les environnements dangereux, coûteux, rares, ou imprévisibles. Elle est ainsi utilisée par exemple : dans l'armée pour l'entraînement des artilleurs (Girardi & de Oliveira, 2019), dans l'industrie pour l'apprentissage de geste technique et de procédure (S. K. Bailey, Johnson, Schroeder, & Marraffino, 2017) ou encore en médecine pour simuler des opérations chirurgicales (McCloy & Stone, 2001). De plus, l'immersion que propose les casques de réalité virtuelle favoriserait le maintien d'un focus attentionnel dirigé vers le contenu présenté comparé à d'autres environnements d'apprentissage (Harrington et al., 2018). Cependant, elle serait aussi susceptible d'entraîner une accumulation accrue de fatigue mentale, entraînant rapidement une baisse des capacités de concentration.

La réalité virtuelle possède un désavantage connu, qui est une raison de son échec dans les années 1990 : la *cybersickness*. En effet, les utilisateurs de casque de réalité virtuelle (HMD) peuvent ressentir un mal semblable au mal des transports. La discordance entre la perception visuelle et le système vestibulaire (qui contribue à la sensation de mouvement et à l'équilibre)

peut provoquer étourdissement, fatigue ou même nausée chez les sujets les plus sensibles ou dans les environnements les plus mouvementés. La fréquence de la cybersickness augmente également avec la durée de l'expérience (Murata, 2004). La fatigue visuelle se déclare plus rapidement en réalité virtuelle via HMD en comparaison à d'autres configurations (Souchet, 2020). De plus, l'inconfort et le poids du casque peuvent assez rapidement devenir source de perturbation chez les sujets. Dans la mesure où nous cherchons à évaluer des processus attentionnels fortement impactés par la fatigue et une baisse de la vigilance. Nous avons convenu dans cette thèse de minimiser les temps de port du casque de réalité virtuelle afin que les participants soient dans les meilleures conditions d'attention possible durant la tâche. Tout en gardant le temps nécessaire pour que les participants s'accommodent de la réalité virtuelle, s'ils n'en ont pas l'habitude. Sachant que dans un environnement classique d'étude du paradigme de Posner, le temps maximum expérimentation recommandée est d'environ 55 minutes (Chica, Martín-Arévalo, Botta, & Lupiáñez, 2014), nous pensons qu'en réalité virtuelle 30 minutes maximum de phase expérimentale devrait être respectées pour éviter de trop nombreuses variables parasites.

1.3.4 Guidage de l'attention en réalité virtuelle

En plongeant l'utilisateur dans un environnement qui présente certains aspects du monde réel, la réalité virtuelle nous offre la possibilité d'observer le comportement humain en temps réel, mais également de fournir un feedback ciblé qui peut permettre d'aider à corriger et ajuster nos comportements. Cependant, un feedback sensoriel inadéquat peut également retarder l'apprentissage. Comme le montre cette étude effectuée en chirurgie, où l'apprentissage d'un geste technique s'est avéré meilleur lorsque le simulateur ne donnait pas de feedback de type toucher, car il était trop éloigné de la sensation lors de la manipulation de vrais instruments (Aïm, Lonjon, Hannouche, & Nizard, 2016). Néanmoins, les progrès incessants de la réalité

virtuelle et augmentée permettent aujourd'hui de créer des environnements d'apprentissage et de formation complexes. Ces technologies sont particulièrement utiles dans la formation procédurale (Azimi et al., 2018; Webel et al., 2013) où les participants doivent acquérir des connaissances procédurales consistant en plusieurs étapes de manipulation d'objets (par exemple, des opérations d'assemblage). Si la manipulation directe des objets favorise l'apprentissage par rapport à la visualisation passive (S. Jang, Vitale, Jyung, & Black, 2017), les systèmes de réalité virtuelle peuvent être inefficaces en raison de la charge cognitive excessive induite par la simulation. En outre, il arrive qu'un écran monté sur la tête soit aussi efficace qu'une simulation de bureau (Buttussi & Chittaro, 2018). Par conséquent, on ne sait pas encore très bien comment concevoir des environnements de formation procédurale optimaux en utilisant la réalité virtuelle ou mixte. De plus, il a été montré qu'un guidage attentionnel était efficace dans le cadre d'apprentissage de procédure. En effet, un aspect clé de la formation immersive est l'attention sélective. Un système efficace devrait orienter l'attention vers le prochain objet à traiter ou à manipuler avec un faible coût cognitif et une bonne performance. Par exemple, Hoareau (2016) a testé l'efficacité d'un guidage visuel en réalité virtuelle pour apprendre une procédure médicale à des techniciens de laboratoire. Elle a observé que le guidage visuel de l'ordre des objets à manipuler améliorait les performances des apprenants, comme l'indique la réduction du temps nécessaire pour effectuer la procédure et la diminution du nombre d'actions incorrectes. Dans une autre étude, Sheikh, Brown, Watson, and Evans (2016) ont montré que des indices de différentes modalités (visuelles/auditives) dirigeaient efficacement l'attention d'une personne vers un personnage cible lors du visionnement d'une vidéo à 360°. Enfin, Lin et ses collègues (2017) ont montré que l'utilisation de flèches directionnelles peut guider l'attention d'une personne afin d'améliorer ses performances en vidéo 360°. Néanmoins, si la réalité virtuelle peut améliorer l'apprentissage de procédure grâce aux indices attentionnels, les connaissances

actuelles sur le sujet sont insuffisantes pour déterminer comment les individus dirigent leur attention dans un environnement écologique immersif à 360°, ni quel type d'indices est le plus efficace à cette fin. La majorité des études sont réalisées en laboratoire à l'aide d'écrans de bureau traditionnels. Dans un environnement écologique immersif, on pourrait s'attendre à obtenir des effets différents compte tenu des changements qu'elle implique (vision 3D, parallaxe, 6DOF, champ visuel étendu). Par exemple, Maringelli, McCarthy, Steed, Slater, and Umilta (2001) ont suggéré une dissociation entre les systèmes attentionnels contrôlant l'espace visuel proximal (proche du sujet) et distal (loin du sujet) grâce à la réalité virtuelle. Ainsi, la réalité virtuelle nous permet de faire un pas de plus vers la généralisation des résultats de laboratoire sur les activités quotidiennes. Comme le disent Olk et al. (2018) : "La réalité virtuelle permet d'établir un pont entre la recherche traditionnelle en laboratoire et les situations quotidiennes." La dernière partie ce manuscrit, proposera des idées et des conseils pour la conception de système de guidage et de formation basés sur les résultats obtenus dans les expériences réalisées durant cette thèse.

2 Le paradigme de Posner en environnement écologique

2.1 Introduction générale du chapitre

La validité écologique est une question qui à animer les débats en psychologie cognitive dès le début des expérimentations en laboratoire (voir par exemple, Brunswik, 1943; Neisser, 1976. La question était de savoir si les études effectuées en laboratoire étaient généralisables et pouvaient s'appliquer pour la description des comportements dans le monde réel. Les expérimentations en laboratoire font souvent appel à des situations non familières et artificielles qui génèrent des comportements inhabituels Bronfenbrenner, 1977. Paradoxalement, dans la pratique, la question de la validité écologique a été peu abordée. L'une des raisons réside dans un manque de solutions satisfaisantes pour mener des études écologiquement valables tout en maintenant une rigueur scientifique et des niveaux élevés de qualité des données Ladouce, Donaldson, Dudchenko, & Ietswaart, 2017. Pourtant aujourd'hui, il existe des solutions technologiques qui permettent de gagner en validité écologique tout en maintenant un niveau élevé de contrôle et de mesures. La réalité virtuelle est l'une de ces solutions. Elle propose une vision stéréoscopique d'un environnement en trois dimensions, plus proche de l'environnement naturel des individus,

que l'utilisation de configuration standard ou les sujets sont assis derrière un ordinateur. Grâce à sa capacité immersive et des interactions pseudo-naturelles avec des objets virtuelles, elle permet de gagner en validité écologique, tout en maintenant un niveau de contrôle expérimental satisfaisant.

Ce premier avantage de la réalité virtuelle nous interroge sur la robustesse du paradigme de Posner dans un environnement écologique. Mais aujourd'hui encore, rare sont les paradigmes expérimentaux qui ont été adaptés en réalité virtuelle. Lorsque ce fut le cas, les résultats ont parfois été similaires entre les versions de bureau et en RV Foerster et al., 2016; Kit et al., 2014 et parfois différents Figueroa, 2018; Li et al., 2016. Le paradigme de Posner est-il assez robuste pour résister à des variations expérimentales destinées à reproduire un environnement de perception et d'action plus proche de ce que les sujets expérimentent au quotidien ? C'est l'objectif de cette première partie de la thèse : étudier les mécanismes d'orientation de l'attention spatiale en environnement écologique par l'utilisation de version adaptée du paradigme de Posner.

Dans un premier temps, en plaçant les participants à l'intérieur d'un environnement virtuel immersif et en leur demandant d'effectuer des actions sur des objets virtuels représentant des stimuli du quotidien, grâce à la réalité virtuelle. Dans un second temps, dans un environnement réel lorsque des actions concrètes (c.-à-d. au-delà d'un simple appui touche) doivent être effectuées sur des objets tangibles grâce à un système de réalité augmentée projetée. Nous avons ainsi évalué si les effets obtenus dans la version classique de ce paradigme étaient transférables en environnement immersif et en environnement réel. Enfin, une dernière expérience sur ordinateur avec une version écologique du paradigme de Posner sera effectuée sur des patients atteints de la maladie de Parkinson afin de mesurer l'impact de la maladie sur leur capacité à orienter leur attention visuospatial au premier stade de la maladie.

Ce chapitre commence donc par une première expérience en réalité virtuelle, dans laquelle nous avons utilisé un paradigme de Posner modifié, dans une tâche de sélection d'ingrédients destiné à la préparation de sandwich dans une enseigne de fast-food virtuelle. Nous avons souhaité tester si le paradigme de Posner était transférable lorsque des stimuli du quotidien sont présentés dans un environnement virtuel immersif et lorsque les participants doivent effectuer une action sur des objets virtuels. Nous nous attendions à un effet de validité comme dans les expériences classiques. Pour ce faire, nous avons souhaité tester des indices exogènes, endogènes, visuels et auditifs fournis au préalable d'une information visuelle à détecter. Cette expérience a fait l'objet d'une publication, intitulé "Orientation attentionnelle en réalité virtuelle au moyen d'indices endogènes et exogènes dans les modalités auditives et visuelles." dans le cadre du symposium ETRA sur les recherches et applications en eye-tracking 2019 Soret, Charras, Hurter, & Peysakhovich, 2019.

Une deuxième expérience en réalité augmentée projetée viendra apporter un caractère écologique supplémentaire en proposant aux participants une action concrète sur des objets tangibles dans le monde réel. Dans cette expérience, nous avons utilisé un projecteur afin d'indiquer aux participants via l'utilisation d'indices visuel exogène et endogène un objet à récupérer parmi deux sur une table placée devant eux. Nous nous attendions à un effet de validité quel que soit le type d'indices. Cette expérience a fait l'objet d'une publication et d'une communication à la conférence Neuroergonomics 2021 (Soret et al, 2021).

Enfin, une dernière expérience réalisée dans le cadre de l'étude des mécanismes d'orientation attentionnelle chez des malades atteints de la maladie de Parkinson viendra clôturer ce chapitre. Pour cela, une version adaptée de la première expérience réalisée en réalité virtuelle a été mise au point pour expérimentation écologique sur ordinateur standard. Dans l'objectif de rendre plus attrayant et motivant un paradigme expérimental particulièrement peu attirant pour les patients. Cette dernière expérience a été rendue possible grâce à une collaboration

avec l'université de Tel Aviv et le centre médicale Sourasky. Cette expérience étant toujours en cours, seul la revue de littérature et la méthodologie sont présentés.

2.2 Paradigme de Posner en réalité virtuelle

Cette expérience de la thèse et une traduction avec modification mineure (reformulation, information supplémentaire) de la publication Soret et al., 2019

2.2.1 Introduction

Une des problématiques de toutes recherches en psychologie expérimentale est de savoir si les expériences menées en laboratoire et les théories basées sur ces expériences sont transposables aux performances humaines dans la vie quotidienne. La validité écologique est un sujet qui intéresse de plus en plus les chercheurs. Mais pour une validité écologique maximale, il faudrait pouvoir tester les participants dans des situations du quotidien. Or, lorsque l'on étudie l'attention, il est très difficile de contrôler les éléments de la vie quotidienne susceptible d'attirer l'attention des participants et de manipuler les stimuli et les conditions. La réalité virtuelle permet de construire un pont entre la recherche traditionnelle en laboratoire et les situations de la vie de tous les jours (Olk et al., 2018). En effet, en réalité virtuelle les stimuli peuvent être affichés de manière réaliste sans perdre l'avantage du contrôle des facteurs expérimentaux. Récemment, Olk et al. (2018), ont cherché à tester si, la tâche de Flanker produit les mêmes résultats lorsque l'on utilise des stimuli qui représentent des objets du quotidien en réalité virtuelle plutôt que de simples lettres affichées sur un ordinateur. Cette étude est l'une des rares à explorer les effets d'un paradigme de science cognitive en réalité virtuelle (p. ex. Foerster et al., 2016; Neider et al., 2011).

Aussi, à ce jour, aucune étude n'a utilisé le Paradigme de Posner en réalité virtuelle afin de lui faire gagner en validité écologique. On ne sait donc pas encore aujourd'hui, si les effets du paradigme de Posner peuvent franchir les portes du laboratoire. Nous ignorons en particulier si mesurer les temps de réponse par une action sur des objets du quotidien

dans un environnement immersif va impacter les résultats observés habituellement. En d'autres termes, nous ne savons pas si les bénéfices fournis par les indices valides dans le paradigme de Posner subsistent lorsqu'une action plus naturelle qu'un appui sur une touche d'un clavier ou d'une souris est demandée aux participants. Même s'ils l'ont peut constater des différences entre des expériences en environnement immersif et sur écran d'ordinateur standard (Figuroa, 2018; Li et al., 2016). Nous pensons que le paradigme de Posner est suffisamment robuste pour être transférable en réalité virtuelle.

Dans cette expérience, nous avons donc adapté le paradigme de Posner à un environnement écologique et immersif en utilisant un casque de réalité virtuelle (HMD) qui à la particularité d'intégrer un système d'eye-tracking. Nous avons manipulé le type d'indice (endogènes, exogènes) et la modalité sensorielle utilisée pour l'indice (visuelle, auditive) dans une tâche de sélection d'ingrédients destinée à la préparation de sandwich dans une enseigne de fast-food virtuelle. Les participants devaient récupérer le plus rapidement possible des ingrédients situés devant eux dans des contenants prévus à cet

Tâche de Flanker

La tâche de Flanker est une tâche permettant de mesurer la capacité à inhiber des distrateurs parmi une information cible. C'est une tâche qui permet de mesurer les capacités de contrôle cognitif des participants (3e réseau d'attention selon Michael Posner). Dans cette tâche les participants doivent identifier le plus rapidement possible une lettre placée au centre d'une suite de lettre en appuyant sur une touche réponse. Par exemple, appuyez sur 1 lorsque vous voyez un A et sur 2 lorsque vous voyez un B. Les lettres peuvent être associées de sorte à appeler une seule réponse, par exemple, AAAA ou BBBB; ou une touche concurrente en même temps, par exemple, AABAA, BBABB. Ces deux conditions expérimentales sont appelées condition congruente (même réponse) et incongruente (réponse concurrente). Dans la condition incongruente, l'individu doit inhiber les informations distractives qui appellent une réponse différente de la réponse à fournir et les temps de réponse s'avèrent plus longs que dans la condition congruente ou aucune inhibition n'est nécessaire. C'est une des tâches les plus utilisées pour mesurer les fonctions exécutives.

effet et les déposer dans une tranche de pain en se servant des indices fournis au préalable. Notre première hypothèse était un effet principal de validité. Nous nous attendions à ce que les indices valides entraînent des temps de réponse plus rapide que les indices invalides, quel que soit le type d'indice utilisé. De plus, nous supposons que les indices auditifs vont produire des temps de réponse globalement plus rapide que les indices visuels étant donné que les stimuli auditifs sont généralement traités plus rapidement que les stimuli visuels (Jose & Gideon Praveen, 2010). Enfin, l'eye-tracker intégré au casque de réalité virtuelle nous a permis de mesurer si un déploiement de l'attention ouverte avait eu lieu durant l'expérience.

2.2.2 Méthode

Participants

Vingt-et-un participants (11 femmes, âge moyen \pm SD: 27 ± 10), étudiants et personnel de l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO, Toulouse), se sont portés volontaires pour participer à l'étude. Conformément à la Déclaration d'Helsinki, tous les participants ont donné leur consentement écrit avant l'expérience. Les participants n'ont reçu aucune contribution pour leur participation.

Matériels

Nous avons utilisé un casque de réalité virtuelle HTC Vive avec un système de suivi des yeux Tobii intégré (<https://www.tobiipro.com/product-listing/vr-integration/>). Le casque est composé d'un écran double AMOLED de 3,6 pouces de diagonale, d'une résolution de 1080*1200 pixels par œil (2160*1200 combinés) avec un taux de rafraîchissement

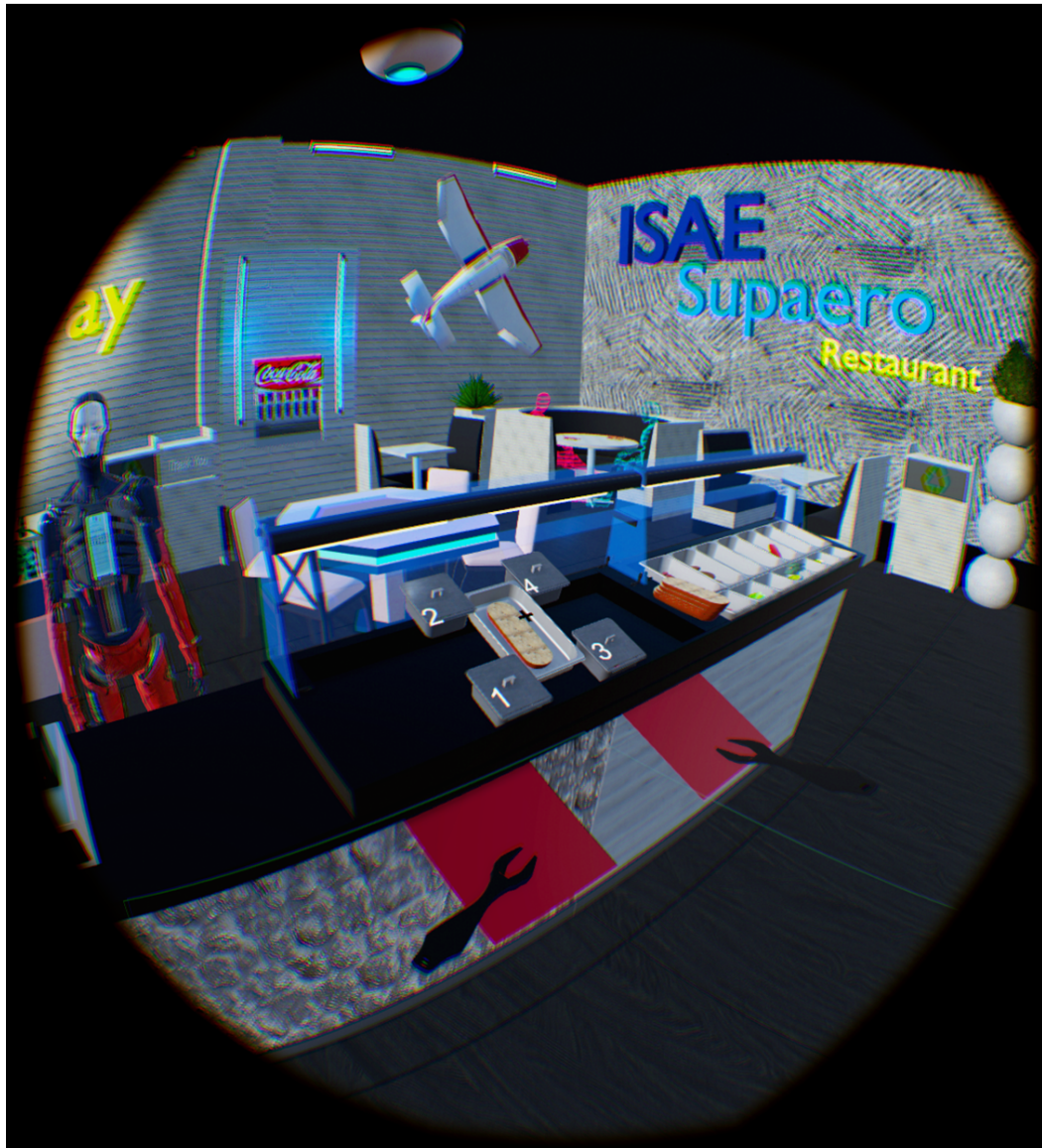


Figure 2.1. Capture de l'environnement virtuel utilisé dans PosnerVR

de 90 Hz et un champ de vision de 110° (145° en diagonale). Les participants ont utilisé les contrôleurs standard du HTC Vive pour interagir avec l'environnement. Le système de suivi oculaire Tobii a une fréquence de sortie (binoculaire) de 120 Hz avec une précision estimée à

0,5°. Le champ de vision de l’eye-tracker est de 110° (champ de vision complet du casque HTC Vive). Le matériel expérimental consistait en une version modifiée du paradigme de Posner, développée à l’aide du moteur de jeu Unity3D supportant la programmation en C# et les plugins nécessaires à la réalité virtuelle (OpenVR et SteamVR) ainsi que le plugin nécessaire à l’eye-tracking Tobii, Tobii Pro SDK.

Stimuli

L’environnement virtuel représentait un restaurant fast-food comprenant un comptoir sur lequel étaient disposés plusieurs bacs gastronorme (récipients métalliques utilisés en cuisine professionnelle). Un gastronorme central de 14° × 25° contenant un morceau de pain de 6° × 23° et des gastronorme de 12° × 12° était placé à 24° d’excentricité du point de fixation. La figure 2.1 montre un exemple de vue du monde virtuel.

Quatre indices différents ont été utilisés et présentés dans le tableau suivant :

	Auditif	Visuel
Endogène	Instruction vocale	Flèche directionnelle
Exogène	Son spatialisé	Surbrillance de l’objet

La surbrillance de l’objet correspondait à un changement de couleur du gastronorme indicé pendant 300 ms (d’un matériau métallique à un gris clair non saturé et inversement). La flèche directionnelle centrale était une flèche gris clair de 3° × 12° placé au centre du FOV expérimentale. L’indice sonore spatialisé était un son stéréo pur d’une durée de 300 ms. Chaque son a été spatialisé à l’emplacement des gastronormes indicés. En raison de la

proximité relative des plateaux et pour améliorer la discrimination perceptive, les sources audio ont été déplacées plus loin (1,20 m sur le côté pour la rangée du bas et 1,06 m en profondeur pour la rangée du haut). L'instruction vocale était un chiffre entre 1 et 4 entendus en accord avec les numéros de chaque gastronorme pendant 300 ms. La cible était une petite demi-sphère rouge d'un diamètre de 0,08 m apparaissant au centre du gastronorme contenant l'ingrédient à récupérer. Nous avons utilisé plusieurs ingrédients (bacon, steak, tranche de viande, salami, tomate, concombre, champignon, salade), de taille similaire, générer aléatoirement à chaque essai. Un couvercle recouvrait les ingrédients avant l'apparition de la cible pour prévenir les effets liés aux caractéristiques physiques des ingrédients. La figure 2.2 donne une représentation schématique des indices valides et invalides (ipsilatéraux et contralatéraux).

Lors des essais valides, l'indice et la cible était présentés au même endroit. Lors des essais invalides, la cible pouvait apparaître à la position verticalement opposée (essai ipsilatérale, présentation de l'indice et de la cible sur un seul hémichamp visuel) ou à la position horizontalement opposée (essai contralatérale, changement d'hémichamp visuel entre l'indice et la cible). Pour une illustration voir figure 2.4.

Procédure

Avant l'expérience, les participants ont été invités à remplir un formulaire de consentement et un questionnaire préliminaire. Une feuille d'instructions sur le déroulement de l'expérience leur a également été fournie. Les participants avaient pour instruction de prendre un ingrédient dans le bac ciblé et de le mettre sur le pain le plus rapidement possible. Ils ont également été informés qu'ils recevraient un indice indiquant l'endroit où la cible apparaîtrait le plus probablement (indice) et que dans 25% des cas, l'indice serait erroné (25% d'essais non

valides, 75% d'essais valides). Plusieurs répétitions de placement libre des ingrédients dans le pain ont été effectuées afin d'habituer les participants à l'interaction. Ensuite, tous les indices utilisés pendant la phase expérimentale étaient présentés une fois aux participants pour chaque condition de validité (valide/invalides). De plus, un entraînement correspondant à 8 essais de chaque bloc de la phase expérimentale a été réalisée par les participants en amont. Cet entraînement introduit une instruction de placement supplémentaire destinée à contrôler la position de départ des participants pendant l'enregistrement de chaque essai.

Chaque essai de la phase expérimentale commençait, une fois les mains et le regard du participant correctement positionnés sur le point de fixation, par l'apparition de l'un des 4 indices possibles en fonction des blocs et du contre-balancement, pendant 300 ms. Après un intervalle inter-stimulus (ISI = 300 ms), la cible apparaissait sur l'un des 4 bacs à ingrédients selon les conditions de validité pendant 300 ms. L'intervalle inter-stimulus a été défini pour permettre le déploiement de l'orientation endogène tout en évitant les effets d'inhibition de retour relatifs aux indices exogènes. Étant donné que l'orientation endogène est connue pour se déployer à partir d'environ 300 ms et que l'orientation exogène est vulnérable à l'inhibition de retour au-delà d'environ 300ms Chica et al., 2014. Cet intervalle inter-stimulus nous a semblé être le meilleur compromis afin de comparer l'effet d'une orientation endogène et d'une orientation exogène sur le traitement de l'information et les réponses motrices associées. Une fois l'ingrédient placé dans le pain, un intervalle de temps minimum de 3 secondes était respecté avant l'essai suivant. La figure 2.3 illustre le déroulement temporel d'un essai valide avec un indice visuel endogène.

La phase expérimentale a été divisée en 4 blocs, chaque bloc correspondant à l'un des quatre signaux ($\{\text{auditif, visuel}\} \times \{\text{endogène, exogène}\}$). Les blocs étaient contrebalancés entre les sujets. Chaque bloc comprenait un total de 40 essais (30 valides, 10 invalides). La moitié des essais invalides étaient ipsilatéraux, et l'autre moitié contralatéraux. La phase

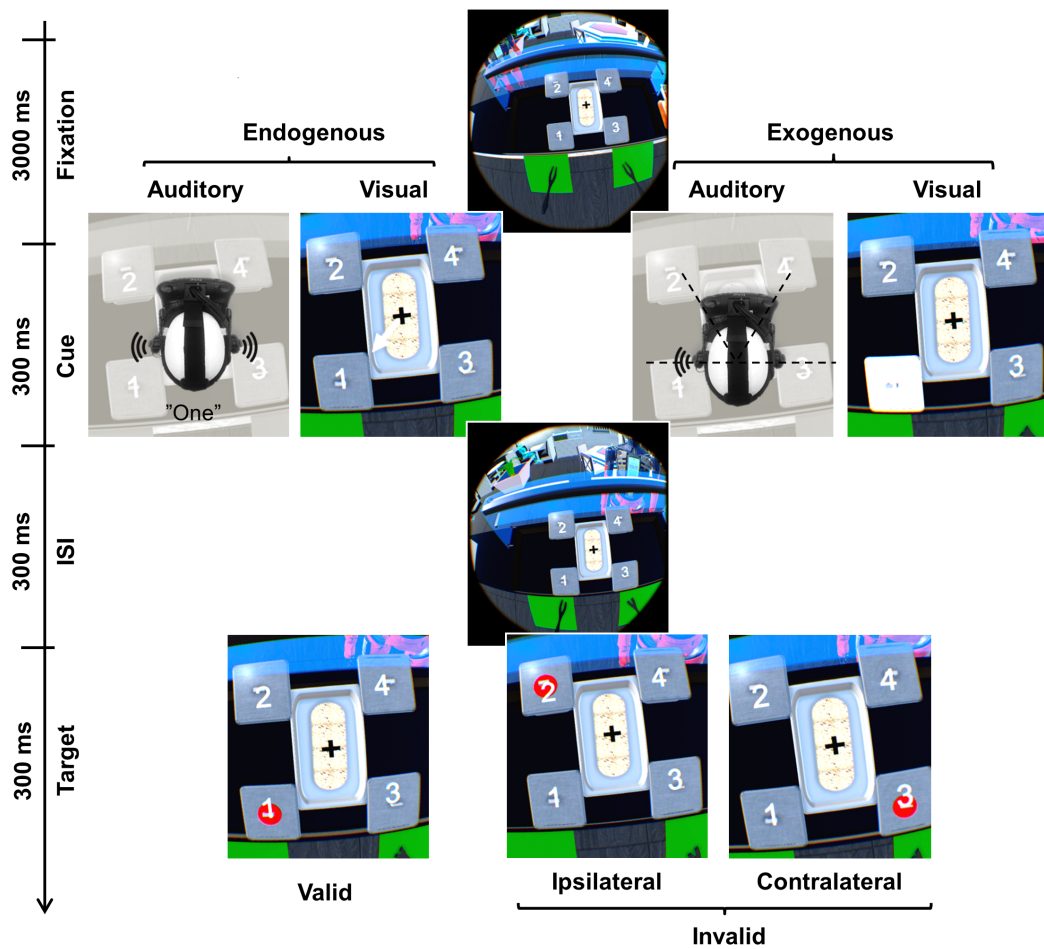


Figure 2.2. De haut en bas, le déroulement temporel d'un essai : fixation de 3 secondes, indice selon la modalité et le type de bloc pendant 300ms, intervalle inter-stimulus de 300 ms et présentation de la cible (petite sphère rouge) pendant 300 ms.

expérimentale comprenait un total de 160 essais, dont 40 indications verbales, 40 flèches directionnelles, 40 sons spatialisés et 40 surbrillances d'objets. L'expérience entière (avec le questionnaire et le temps d'instruction) durait environ 40 minutes.

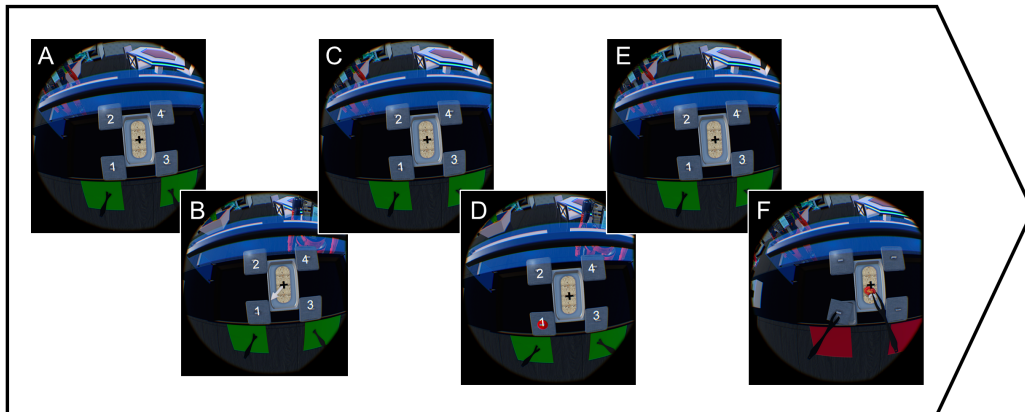


Figure 2.3. Exemple d'un essai valide où le couvercle inférieur gauche a été désigné par une flèche directionnelle centrale : A) fixation sur la croix centrale pour commencer l'essai, position des mains contrôlée à l'aide de cases interactives qui sont vertes lorsque la manette se trouve à l'intérieur ; B) indiçage d'un plateau (ici un exemple d'indiçage visuel endogène du plateau 1) ; C) ISI ; D) présentation de la cible, l'essai est valide ; E) temps de réponse avant l'initiation de l'action ; F) le participant a utilisé la manette pour prendre l'ingrédient indiqué.

2.2.3 Résultats

Analyse des données

Nous avons enregistré deux temps de réponse moteurs différents qui démarrent après l'apparition de la cible. Nous avons nommé le premier **l'initiation de l'action**, qui correspond au moment où le participant retire l'une de ses mains de la position de repos (enlève la manette de la zone de détection). Nous avons nommé le deuxième **Prise du couvercle**, qui correspond au moment où le participant prend le couvercle. Nous avons également mesuré

les mouvements des yeux tout au long de l'expérience et plus particulièrement : **l'initiation du regard**, le moment où le participant cesse de regarder le point de fixation central ; et **Regard sur le couvercle**, qui correspond au moment où le participant regarde l'un des 4 couvercles. La précision de la prise du couvercle et du regard sur le couvercle a également été enregistrée. Les mesures comportementales ont été enregistrées à l'aide d'un "collider" (une boîte virtuelle qui se déclenche lorsqu'un objet touche ou traverse cette boîte) placé sur différents objets de la scène virtuelle. Les mouvements des yeux ont été obtenus au moyen d'un "raycast", une droite virtuelle qui part du centre de chaque œil et dont la position est déterminée par l'eye tracking intégré au casque. L'on peut savoir ce que la personne regarde dès lors que ce raycast traverse un objet virtuel.

Les essais impliquant une "initiation de l'action" avant l'apparition de la cible ont été exclus (7%), car une initiation précoce de l'action (avant l'apparition de la cible) selon les sujets pourrait être à l'origine des résultats observés. Les essais impliquant une "initiation du regard" avant l'apparition de la cible ont été exclus pour les mesures "initiation du regard" (19%) et "regard sur le couvercle" (36%). Les sujets ont souvent effectué l'action sans regarder directement les bacs à ingrédients ou sans bouger les yeux. Les mesures "initiation du regard" et "regard sur le couvercle" présente donc un pourcentage d'exclusion plus élevée, car elles ne sont pas systématiquement présentes à chaque essai et que le calcul d'exclusion est effectué sur le nombre total d'essais de l'expérience. 3 participants pour "initiation du regard" et 4 pour "regard sur le couvercle" ont été exclus en raison d'un nombre nul d'essais dans l'une des conditions expérimentales. Les temps de réponse des sujets pour l'initiation de l'action et la prise du couvercle ont été calculés à partir du début de la présentation de la cible. Les temps de réponse du sujet pour l'initiation du regard et le regard sur le couvercle ont été calculés à partir du début de l'essai, pour tenir compte des essais où la première fixation sur le couvercle a été faite pendant l'apparition de la cible et parce que l'initiation du regard a

souvent lieu avant l'apparition de la cible. Au total, pour l'analyse statistique, nous avons eu 27.7 ± 2.3 sur 30 essais valides et 9.6 ± 0.7 sur 10 essais invalides pour l'initiation de l'action, 27.4 ± 2.4 valides et 9.4 ± 0.8 essais invalides pour la prise du couvercle, 21.3 ± 5.7 valides et 7.7 ± 2.0 essais invalides pour la l'initiation du regard et 16.9 ± 4.8 valides et 6.2 ± 2.0 essais invalides pour le regard sur le couvercle.

À la vue des résultats de la première analyse, nous avons décidé d'effectuer une deuxième analyse afin de comparer les indices qui dirige l'attention dans, et à travers, les hémichamps visuels, impliquant un "effet de validité" pour les cibles ipsilatérales et contralatérales ; et les indices qui peuvent diriger l'attention uniquement à travers les hémichamps visuels, impliquant un "effet de validité" pour les cibles contralatérales uniquement (voir figure 2.4). Pour cette analyse, nous avons exclu les indices invalides ipsilatéraux, en conservant les indices valides et les indices invalides contralatéraux. Un participant pour l'initiation de l'action et la prise du couvercle, 4 participants pour l'initiation du mouvement des yeux et 6 pour le regard sur le couvercle ont été exclus en raison d'un nombre nul d'essais dans l'une des conditions expérimentales. Pour cette deuxième analyse, le nombre moyen d'enregistrements était de : 27.6 ± 2.3 valides sur 30 et 5.0 ± 1.4 sur 10 essais invalides pour l'initiation à l'action, 27.3 ± 2.4 valides sur 30 et 4.9 ± 1.4 d'essais invalides pour la prise du couvercle, 21.2 ± 5.7 valides et 4.1 ± 1.5 essais invalides pour la fuite du point de fixation, et 16.0 ± 5.4 valides et 3.2 ± 1.4 essais invalides pour le regard sur le couvercle. Nous avons également effectué une analyse statistique sur le nombre d'essais en fonction des conditions expérimentales qui indique que le nombre d'essais perdus était indépendant de la condition expérimentale.

Nous avons utilisé le logiciel JASP pour l'analyse statistique. Nous avons effectué des analyses de variance (ANOVA) à trois facteurs sur les TR moyens pour chaque mesure [Initiation de l'action, Fuite du point de fixation, Prise du couvercle et regard sur le couvercle]

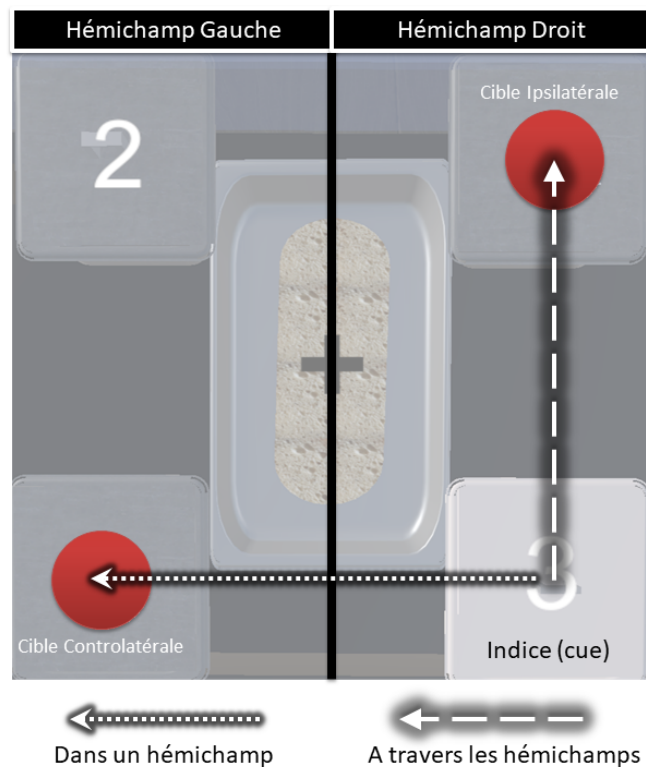


Figure 2.4. Illustration d'un déplacement de l'attention en fonction de la localisation de la cible pour les essais invalides. La boîte numéro 3 est indiquée. La cible peut apparaître sur la boîte numéro 4 (cible ipsilatérale) ou la boîte numéro 2 (cible contralatérale). Lorsque la cible est ipsilatérale le déplacement de l'attention s'effectue dans l'hémichamp visuel droit ("within hemifield"). Lorsque la cible est contralatérale, le déplacement de l'attention s'effectue à travers les hémichamps visuels ("across hemifield")

pour observer les effets de : Validité (Valide/Invalide), Modalité (Audiovisuelle) et Type d'indice (Exogène/Endogène). Le test LSD de Fisher a été utilisé pour les comparaisons

post-hoc.

Mouvements des yeux

L'ANOVA n'a révélé aucun effet principal significatif ni aucune interaction pour les mesures Fuite du point de fixation et Regard sur le couvercle. Que ce soit pour les analyses incluant tous les indices invalides ou incluant uniquement les indices invalides controlatéraux (tous les $p > 0,1$).

Réponse Motrice

Initiation de l'action (Analyse complète)

L'effet principal de validité est significatif $F(1,20) = 19.3, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.49$. Les participants ont initié leurs actions significativement plus vite lorsque l'indice était valide plutôt qu'invalides. Un effet principal de la modalité de l'indice est également observé $F(1,20) = 7.1, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.26$. Les participants ont été plus rapides à régir après un indice auditif plutôt que visuelle, indépendamment de la validité de l'indice.

L'analyse révèle également une interaction significative entre nos trois facteurs expérimentaux : validité, modalité et type d'indice $F(1,20) = 13.7, p = 0.001, \eta_p^2 = 0.41$ (voir Figure 3.5). L'interaction indique que l'effet de validité observée sur l'initiation de l'action est dépendant du type d'indice et de la modalité. L'analyse des effets simples de la validité en fonction de la modalité et du type d'indice indique que l'effet de validité est significatif pour les indices endogènes auditifs ($p < 0.001$) et les indices exogènes visuels ($p = 0.001$). Aucune différence en fonction de la validité de l'indice n'a été observée pour les indices exogènes auditifs et endogènes visuelles (voir tableau 2.2). Aucun autre effet principal ni interaction n'a été

observé (tous les $p > 0.1$, voir tableau 2.1).

Table 2.1

RMANOVA pour l'initiation de l'action

Cases	Sum of Sq.	df	Mean Sq.	F	p	η^2
Validite	0.023	1	0.023	19.308	2.800e-4	0.491
Residuals	0.024	20	0.001			
Modalite	0.042	1	0.042	7.083	0.015	0.262
Residuals	0.120	20	0.006			
Type d'indice	0.002	1	0.002	1.274	0.272	0.060
Residuals	0.034	20	0.002			
Modalité * Validite	7.093e-5	1	7.093e-5	0.037	0.850	0.002
Residuals	0.034	20	0.002			
Type d'indice * Validite	5.395e-4	1	5.395e-4	0.527	0.476	0.026
Residuals	0.034	20	0.002			
Type d'indice * Modalite	2.232e-6	1	2.232e-6	2.548e-4	0.987	1.274e-5
Residuals	0.034	20	0.002			
Type d'indice * Modalite * Validite	0.015	1	0.015	13.737	0.001	0.407
Residuals	0.034	20	0.002			

Table 2.2

Effet simple de la Validité en fonction de la modalité et du type d'indice

Modalité	Type d'indice	Sum of Sq.	df	Mean Sq.	F	p
Auditif	Endogene	0.023	1	0.023	8.798	0.008
	Exogene	7.415e-5	1	7.415e-5	0.149	0.704
Visuel	Endogene	5.484e-4	1	5.484e-4	0.752	0.396
	Exogene	0.015	1	0.015	10.861	0.004

Analyse sans essai invalide ipsilateral

Comme pour l'analyse précédente, l'ANOVA a révélé un effet principal significatif de la validité, $F(1, 19) = 21.5, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.53$, et de la modalité, $F(1, 19) = 5.0, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.21$. L'interaction à trois facteurs n'est plus significative, $F(1, 19) = 4.0, p = 0.064, \eta_p^2 = 0.17$. Aucun autre effet principal ni interaction n'a été observé (tous les $p > 0.1$).

Table 2.3

RMANOVA pour intitation de l'action (contralatérale invalide)

Cases	Sum of Sq.	df	Mean Sq.	F	p	η^2
Validite	0.055	1	0.055	21.530	1.785e-4	0.531
Residuals	0.048	19	0.003			
Modalite	0.037	1	0.037	4.981	0.038	0.208
Residuals	0.140	19	0.007			
Type d'indice	0.002	1	0.002	0.543	0.470	0.028
Residuals	0.063	19	0.003			
Modalite * Validite	2.456e-4	1	2.456e-4	0.064	0.803	0.003
Residuals	0.063	19	0.003			
Type d'indice * Validite	5.608e-4	1	5.608e-4	0.255	0.619	0.013
Residuals	0.063	19	0.003			
Type d'indice * Modalite	0.002	1	0.002	0.224	0.642	0.012
Residuals	0.063	19	0.003			
Type d'indice * Modalite * Validite	0.006	1	0.006	3.869	0.064	0.169
Residuals	0.063	19	0.003			

Prise du couvercle (Analyse complète)

L'ANOVA montre un effet principal significatif de la validité de l'indice $F(1, 20) = 37.9, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.65$. Les participants soulèvent le couvercle significativement plus vite dans les essais valides comparés aux essais invalides. Nous observons également un effet principal du type d'indice $F(1, 20) = 6.8, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.25$. Les participants sont significativement plus rapides à récupérer le couvercle après un indice exogène plutôt qu'endogène. Enfin, nous observons ici également une triple interaction, $F(1, 20) = 11.2, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.36$ (see Figure 3.6). Les comparaisons Post-hoc indiquent que l'effet de validité est significatif pour les indices endogènes auditifs ($p < 0.001$) et les indices visuels exogènes ($p < 0.05$). Aucun autre effet principal ni interaction n'a été observé (tous les $p > 0.1$).

Analyse sans essai invalide ipsilateral

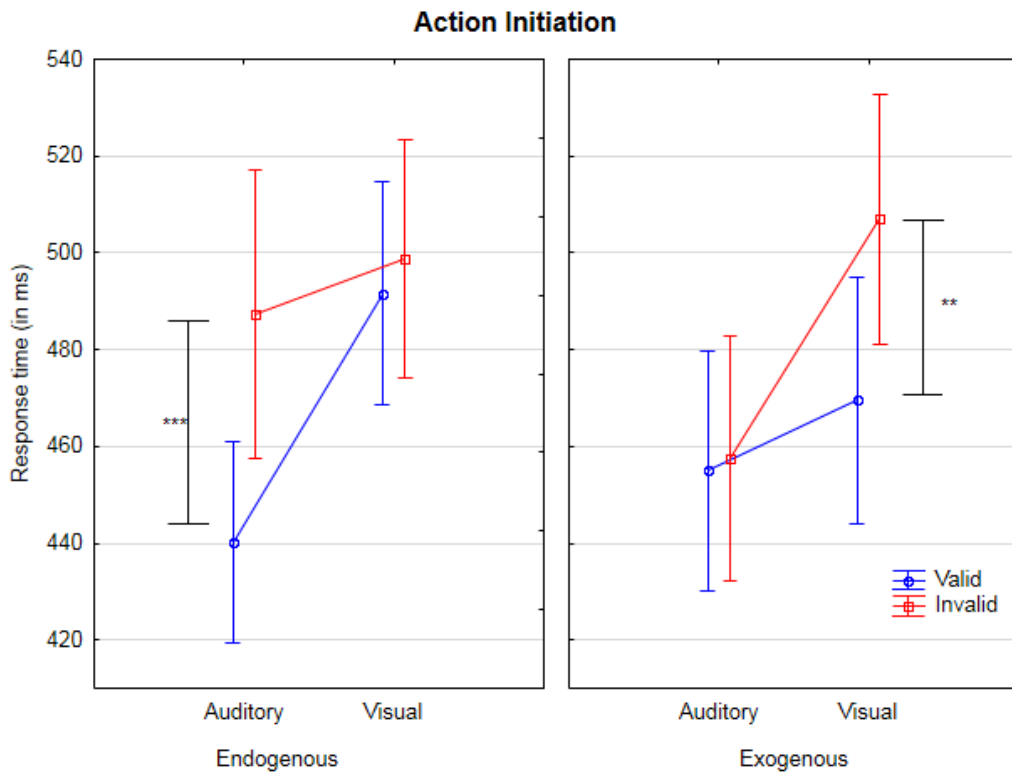


Figure 2.5. Temps de réponse moyen pour l'initiation de l'action

* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.001$

Comme pour l'analyse complète, l'ANOVA montre un effet principal de validité significatif $F(1, 19) = 39.6, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.68$. La triple interaction entre les facteurs de validité, de modalité et de type d'indice n'est plus significative, $F(1, 19) = 1.7, p = 0.21, \eta_p^2 = 0.08$. Aucun autre effet principal ni interaction n'a été observé (tous les $p > 0.1$).

2.2.4 Conclusion et discussion

L'objectif de la présente étude était de déterminer l'efficacité des indices endogènes et exogènes dans les modalités auditives et visuelles, destinés à orienter l'attention en réalité

Table 2.4

RMANOVA pour la prise du couvercle

Cases	Sum of Sq.	df	Mean Sq.	F	p	η^2
Validite	0.151	1	0.151	37.865	5.180e-6	0.654
Residuals	0.080	20	0.004			
Modalite	0.008	1	0.008	0.371	0.549	0.018
Residuals	0.411	20	0.021			
Type d'indice	0.041	1	0.041	6.760	0.017	0.253
Residuals	0.123	20	0.006			
Modalite * Validite	0.025	1	0.025	2.784	0.111	0.122
Residuals	0.123	20	0.006			
Type d'indice * Validite	0.012	1	0.012	3.222	0.088	0.139
Residuals	0.123	20	0.006			
Type d'indice * Modalite	0.014	1	0.014	0.961	0.339	0.046
Residuals	0.123	20	0.006			
Type d'indice * Modalite * Validite	0.061	1	0.061	11.219	0.003	0.359
Residuals	0.123	20	0.006			

Table 2.5

Effet simple de la Validite en fonction de la modalité et du type d'indice

Modalité	Type d'indice	Sum of Sq.	df	Mean Sq.	F	p
Auditif	Endogene	0.205	1	0.205	26.392	5.016e-5
	Exogene	0.009	1	0.009	2.068	0.166
Visuel	Endogene	0.002	1	0.002	0.393	0.538
	Exogene	0.033	1	0.033	7.277	0.014

virtuelle. Le paradigme de Posner (1980) a démontré que l'utilisation d'indices perceptifs destinés à orienter l'attention d'une personne pouvait améliorer les performances et la rapidité du traitement de l'information visuelle. Malheureusement, la plupart de ces études sont réalisées en laboratoire sur un écran d'ordinateur standard, des conditions expérimentales qui manque de validité écologique. Nous avons donc conçu une version écologique en environnement immersif du paradigme de Posner qui nous permet de déterminer par des mesures comportementales l'influence de la modalité des indices (auditives/visuelles) et du type d'indices (exogènes/endogènes) sur les temps d'actions des sujets. L'utilisation d'un

Table 2.6

RMANOVA pour la prise du couvercle contralatérale

Cases	Sum of Sq.	df	Mean Sq.	F	p	η^2
Validite	0.271	1	0.271	39.564	4.878e-6	0.676
Residuals	0.130	19	0.007			
Modalite	0.008	1	0.008	0.412	0.529	0.021
Residuals	0.376	19	0.020			
Type d'indice	0.013	1	0.013	1.249	0.278	0.062
Residuals	0.200	19	0.011			
Modalite * Validite	0.022	1	0.022	1.956	0.178	0.093
Residuals	0.200	19	0.011			
Type d'indice * Validite	0.002	1	0.002	0.235	0.634	0.012
Residuals	0.200	19	0.011			
Type d'indice * Modalite	8.645e-5	1	8.645e-5	0.004	0.948	2.306e-4
Residuals	0.200	19	0.011			
Type d'indice * Modalite * Validite	0.018	1	0.018	1.657	0.213	0.080
Residuals	0.200	19	0.011			

casque de réalité virtuelle équipé d'un système d'eye-tracking nous a également permis de suivre les mouvements de l'attention ouverte durant l'expérience et d'affiner nos résultats sur l'orientation couverte que nous avons souhaité étudier.

Effet de validité

Comme nous le supposions, nous avons observé un effet principal de la validité de l'indice. Les participants traitent les informations plus rapidement lorsque la position de la cible prédite par l'indice est juste (valide) plutôt qu'erronée (invalide). Les participants traitent donc les informations plus rapidement lorsque l'indice dirige leur attention vers l'emplacement effectif de la cible que lorsqu'il dirige leur attention vers une autre région de l'espace. L'utilisation d'indices visuels ou auditifs peut donc permettre de diriger l'attention d'une personne et d'améliorer le traitement de l'information en réalité virtuelle. Il semblerait donc que les connaissances obtenues en laboratoire par l'expérimentation sur un écran d'ordinateur standard puissent être transposées dans un environnement écologique immersif.

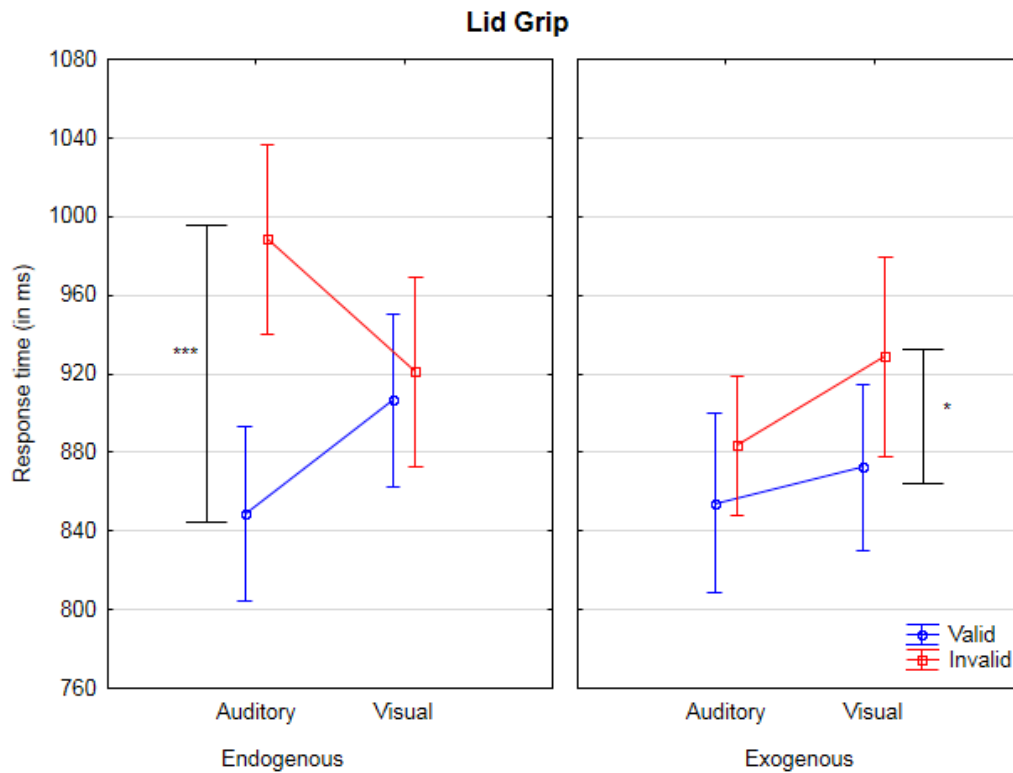


Figure 2.6. Moyenne des temps de réponse pour la prise du couvercle.

* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.001$

Il se peut également que les mécanismes cognitifs de l'attention identifiés dans les laboratoires puissent être transposés dans des conditions proches de ce que les individus expérimentent au quotidien. Cependant, l'utilisation de la réalité virtuelle a révélé des différences par rapport aux études ultérieures effectuées sur écran d'ordinateur.

Orientation "globale" et "locale"

Lors de l'analyse complète des résultats, nous avons constaté que seules l'instruction vocale et la surbrillance de l'objet ont donné lieu à un effet significatif de la validité de

l'indice. Devant ces résultats surprenants, nous avons voulu comprendre cette absence d'effet. Étant donné que nous avons utilisés 4 positions spatiales contrairement à un paradigme de Posner classique. Nous avons supposé que la localisation de la cible pour les essais invalides à pu impacter nos résultats. Nous avons donc effectué une deuxième analyse afin de comprendre l'absence d'effet surprenant de la flèche directionnelle et du son spatialisé. Nous avons donc une première analyse complète avec toutes les conditions d'invalidité de l'indice (ipsilatéral et contralatérale) et une deuxième analyse avec uniquement la condition d'invalidité contralatérale (comme c'est le cas dans une tâche de Posner classique droite-gauche). La comparaison de ces deux analyses nous a permis d'estimer la propension des indices à orienter l'attention dans et à travers les hémichamps visuels (1ère analyse) ou uniquement à travers les hémichamps visuels (2ème analyse). Cette analyse est une analyse à posteriori, étant donné qu'aucune hypothèse n'a été établie dans le développement de cette expérience sur ce point. Nous avons effectué cette analyse à titre indicatif pour orienter de future recherche. Une étude qui intègre dès sa conception les hémichamps visuels notamment dans le calcul du nombre d'essais devrait être réalisée pour étudier précisément les différences d'orientations entre hémichamp qui semble exister lors de l'utilisation du paradigme de Posner en réalité virtuelle. En effet, dans la deuxième analyse (orientation à travers les hémichamps), on observe un effet principal de la validité sans interaction qui indique que l'utilisation d'indices peut diriger l'attention d'une personne indépendamment des types d'indices (exogènes/endogènes) et de la modalité (visuelle/auditive). Cette facilitation est observée sur les temps de réaction (déclenchement de l'action) et d'action (prise du couvercle). Cependant, cette facilitation fournie par tous les indices n'existe que si nous excluons les essais ipsilatéraux invalides, c'est-à-dire lorsque la cible apparaît dans le même champ visuel que l'indice. Si l'on considère tous les essais invalides, tant ipsi- que contralatéraux, seuls les indices auditifs endogènes (instructions vocales) et les indices visuels exogènes (flash

lumineux) produisent des bénéfices (effet de validité significatif), comme l'indique l'effet d'interaction observée.

Au vu de cette deuxième analyse, nous supposons que les indices auditifs endogènes (instructions vocales) et les indices visuels exogènes (surbrillance de l'objet) guident l'attention localement, ce qui signifie que l'orientation cachée de l'attention à été déployée dans une région précise de l'espace visuelle. Comme le montre la préservation de l'effet de validité indépendamment de l'hémichamp d'apparition de la cible pour les essais invalides (effet de validité significatif dans les deux analyses). D'autre part, l'indice auditif exogène (son spatialisé) et l'indice visuel endogène (flèche directionnelle) dirigent l'attention de manière plus globale ou diffuse, ce qui signifie que l'orientation cachée de l'attention à été déployée sur un hémichamp visuel complet et il n'y a de différence entre les indices valides et invalides lorsque qu'ils sont présenté sur le même hémichamp visuel (effet de validité significatif à travers les hémichamps uniquement). Notez que nous interprétons l'absence d'effet de validité dans l'hémichamp visuel comme une absence de coût de traitement pour les essais invalides dans les conditions ipsilatérale (orientation à l'intérieur de l'hémichamp) en nous basant sur la littérature (Mathôt, Hickey, & Theeuwes, 2010; Umiltà, Riggio, Dascola, & Rizzolatti, 1991). Cependant, sans une condition neutre appropriée, nous ne pouvons pas déduire si l'absence d'effet d'indigage est due à un avantage de traitement ou à un coût supplémentaire pour les essais valides dans cette condition (au sein de l'hémichamp visuel). Des études supplémentaires sont nécessaires pour clarifier ce point.

Une explication possible de nos résultats est la nature de la sélection attentionnelle effectuée pour orienter son attention. En effet, deux théories sont proposées pour décrire les processus de sélection visuelle et d'orientation attentionnelle. La première théorie défend l'idée que la sélection visuelle attentionnelle a lieu par la sélection d'une région de l'espace visuelle (C. W. Eriksen & Hoffman, 1973; Maringelli et al., 2001; Posner, 1980) et est

connue sous le nom de "Space base attention". Les bénéfices observés dans le paradigme de Posner seraient donc dus à la préparation du traitement vers une certaine région de l'espace indépendamment des objets contenus dans cette région. Une deuxième théorie défend l'idée que la sélection est davantage basée sur les objets plutôt que sur une certaine région de l'espace (Egly, Driver, & Rafal, 1994; Moore, Yantis, & Vaughan, 1998). La sélection serait spatiale parce qu'un objet occupe nécessairement une certaine région de l'espace, mais c'est l'objet en lui-même qui serait sélectionné plutôt que la région de l'espace qu'il occupe. De nombreuses études ont montré que les deux modes de sélection peuvent influencer la répartition de l'attention. Cependant, on ne sait pas encore quels facteurs conduiront à baser notre sélection sur les objets ou sur une région de l'espace. Néanmoins, il existe un consensus sur le fait que les deux modes de sélection coexistent dans le système visuel (Mozer & Vecera, 2005). Il est possible que le type d'indice utilisé détermine la méthode de sélection. L'hypothèse que nous avançons alors est que les indices suggérés précédemment comme permettant une orientation attentionnelle globale (la flèche directionnelle et le son spatialisé) manquent de précision spatiale. Ils fournissent des informations insuffisamment précises sur l'occurrence de la cible, ce qui conduit à une sélection basée sur l'objet (le bac) plutôt que sur une région spécifique de l'espace. On peut supposer que la flèche directionnelle et le son spatialisé fournissent des informations de localisation à faible résolution spatiale (moins précise spatialement) par rapport à la surbrillance du bac ou à l'indication verbale se référant à une position spatiale prédéfinie. Par conséquent, si la flèche directionnelle et le son spatialisé conduisent à une orientation basée sur l'objet (en raison de leur faible précision spatiale), en considérant la différenciation du traitement en fonction de l'hémichamp visuelle. Les avantages du traitement dus à l'indication de l'objet peuvent être étendus à tous les objets identiques dans le même hémichamp visuel. Cette hypothèse est conforme aux travaux de Egly et al (1994) et Reuter-Lorenz et al (1996), qui ont suggéré une spécialisation cérébrale

de l'attention basée sur l'objet. Par ailleurs, des travaux plus récents d'Ozaki et al (2009) ont montré que la réorientation de l'attention à travers les hémichamps visuels, à l'aide d'une flèche directionnelle, produit un effet d'indication significatif alors que la réorientation à l'intérieur d'un hémichamp ne révèle pas d'effet significatif. L'analyse par IRMf a également révélé une dissociation de l'activation cérébrale dans la région pariétale postérieure droite entre une réorientation de l'attention à l'intérieur et à travers les hémichamps visuels.

Orientation ouverte et couverte

Les gens peuvent diriger leur attention sur un objet ou une région de l'espace visuel de manière cachée en allouant des ressources d'attention ou ouvertement en effectuant un mouvement des yeux. L'une des plus anciennes questions sur l'orientation de l'attention est de savoir dans quelle mesure le déplacement de l'attention est indépendant du déplacement du regard (Posner, 1980). De nombreuses études ont suggéré une relation étroite entre la préparation du mouvement oculaire et l'attention (Awh et al., 2006; Deubel & Schneider, 2003; Rizzolatti et al., 1987) ; ou le couplage de l'attention spatiale et de la préparation saccadique (Hoffman & Subramaniam, 1995; Kowler et al., 1995) ou une dissociation selon le type d'orientation, exogène ou endogène (D. T. Smith & Schenk, 2012). D'autres enfin ont soutenu une distinction fonctionnelle entre le mouvement des yeux et l'attention (Juan, Shorter-Jacobi, & Schall, 2004; Posner et al., 1980). Dans notre étude, nous n'avons trouvé aucun effet significatif de la validité de l'indice sur les mouvements oculaires des participants. La validité de l'indice n'a pas d'impact l'initiation du regard (fuite du point de fixation) après l'apparition de la cible ou la première fixation sur le couvercle. Ce résultat est cohérent avec l'étude de Juan et al. qui a montré que les structures sensorimotrices peuvent diriger l'attention de manière cachée sans préparation saccadique.

Par conséquent, nous soutenons que, bien que le mouvement des yeux et l'attention

partagent une relation étroite, il peut y avoir une orientation attentionnelle sans mouvement des yeux (Posner et al., 1980). Notez que la réciproque est fautive : nous ne pouvons pas avoir un déplacement du regard sans un déplacement attentionnel préalable (Hoffman & Subramaniam, 1995; Peterson, Kramer, & Irwin, 2004). De la même manière, nos résultats suggèrent également que les mouvements oculaires des sujets n'ont permis de révéler les bénéfices apportés par l'indice, alors que les réponses motrices ont révélé un effet bénéfique de l'indice sur le traitement de la cible par le sujet. Les temps de réponse moteurs utilisés pour étudier les effets de l'orientation attentionnelle ne peuvent donc pas être complètement remplacés par le suivi oculaire (parfois qualifié de mesure plus directe ; Duc, Bays, & Husain, 2008). La poursuite oculaire doit de préférence être combinée, autant que possible, avec des mesures comportementales et/ou physiologiques. En effet, les bénéfices de l'attention couverte ne peuvent pas toujours être mesurés en observant exclusivement le mouvement des yeux des sujets. Ne pas regarder ouvertement une information visuelle ne signifie pas nécessairement ne pas y prêter attention. Ainsi, un modèle de déplacement visuel n'est pas exactement le même qu'un modèle de déplacement attentionnel. Il s'agit d'un problème bien connu des chercheurs qui s'intéressent à l'eye-tracking. En effet, un eye-tracker ne peut suivre que les mouvements de l'attention manifeste et non ceux de l'attention couverte. Cela nous rappelle l'importante hypothèse implicite de toute recherche sur l'attention par l'analyse des mouvements oculaires : "Nous supposons que l'attention est liée à la direction du regard fovéal, mais nous reconnaissons qu'il n'en est pas toujours ainsi" (Duchowski, 2007). Si de nombreuses études acceptent cette hypothèse implicite et la mettent en avant dans l'interprétation de leurs travaux (Bucher & Schumacher, 2006), d'autres rejettent avec assurance l'impact que pourrait avoir l'attention couverte, dans leurs recherches (Findlay & Gilchrist, 1998). Cela soulève une question intéressante pour les futures études sur l'orientation couverte, en particulier pour la recherche dans les environnements immersifs

360° : Est-il possible de diriger l'attention d'une personne en dehors du champ visuel de l'utilisateur et ainsi améliorer la performance du traitement de l'information ? Nous étudierons cette question dans la deuxième partie de cette thèse.

2.3 Paradigme de Posner en réalité augmentée projetée

2.3.1 Introduction

La précédente expérience avait pour objectif de déterminer si le paradigme de Posner était transférable en réalité virtuelle. La réalité virtuelle ayant l'avantage de plonger l'utilisateur dans un environnement immersif pseudo-naturel. Cet environnement expérimental permet de gagner en validité écologique comparée à un environnement standard de laboratoire. Nous avons observé que l'effet de validité persistait dans les conditions écologiques d'une tâche de préparation de sandwich en RV. Ces résultats montrent que le paradigme de Posner peut être utilisé en réalité virtuelle pour étudier les mécanismes d'orientation de l'attention spatiale et pour mesurer la capacité d'un indice visuel ou auditif à orienter l'attention d'une personne. Il est ainsi possible de déterminer quel type de stimulation doit être utilisée pour guider efficacement l'attention des utilisateurs en réalité virtuelle. L'on peut alors imaginer des systèmes de guidage attentionnel basé sur des études réalisées grâce au paradigme de Posner en VR, afin par exemple, d'aider à l'apprentissage de procédure. Si la réalité virtuelle permet de gagner en validité écologique, et construit un pont entre les conditions de laboratoire et l'environnement réel. Il nous reste à franchir ce pont, et à tester le paradigme de Posner dans le monde réel. La difficulté principale étant d'afficher des informations visuelles directement dans le monde réel. Néanmoins, il existe aujourd'hui des technologies qui le permettent, les technologies de réalité augmentée. En combinant des informations numériques et des informations réelles, la réalité augmentée permet d'être au plus proche des conditions naturelles de déploiement de l'attention. En effet, dans un dispositif de réalité augmentée l'on affiche des informations virtuelles en superposition des informations

perçue dans le monde réel. Il ne s'agit donc plus de simuler entièrement un monde virtuel comme en réalité virtuelle, mais "d'augmenter" la réalité en ajoutant des informations dans le monde réel. Cette technologie permet donc de tester les effets du paradigme de Posner en environnement réel. Nous avons donc grâce à cette technologie mise au point une tâche de Posner en réalité augmentée projetée afin de tester l'efficacité d'indice visuelle à orienter l'attention dans le monde réel. Nous souhaitons à ce que l'action que le participant effectue soit également plus élaborée qu'un appui touche réponse. Nous avons ainsi mesuré le temps de préhension d'un objet réel. Une réponse qui nécessite une action concrète sur un objet tangible. Toujours dans l'objectif de faire gagner en validité écologique, le paradigme le plus utilisé dans les études sur l'orientation de l'attention.

Nous avons demandé aux participants de prendre un objet parmi deux, indiquer en rouge, le plus rapidement possible en utilisant un indice. Indice projeté au moyen d'un vidéoprojecteur sur une table placé devant les participants. Nous avons utilisé une flèche directionnelle (orientation endogène, top-down) et un flash lumineux (orientation exogène, bottom-up), qui pouvait être valides et invalides. C'est-à-dire indiquer ou non le bon objet à prendre. Notre hypothèse est que les indices valides permettront au participant de récupérer l'objet plus rapidement que les indices invalides. L'on pourrait également observée une différence de vitesse de traitement en fonction du type des indices (endogènes/exogènes).

2.3.2 Méthode

Participants

Douze volontaires étudiants et personnel de l'institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE-SUPAERO, Toulouse), se sont portés volontaires pour participer à l'étude. Conformément à la Déclaration d'Helsinki, tous les participants ont donné leur consentement écrit avant l'expérience. Les participants n'ont reçu aucune contribution pour leur participation.



Figure 2.7. Système de réalité augmentée projetée

Matériel

Nous avons imprimé des objets grâce à des imprimantes 3D. Les objets à récupérer étaient des outils de la forme d'un scalpel de dimension 18cm*1cm*3cm. Ces objets étaient posés

sur des bases de réceptions, elle aussi, imprimé en 3D. Ces bases étaient connectées à un Arduino Nano. Une bande de cuivre conductrice était collée sur l'objet pour conduire le signal électrique entre les deux pieds de la base de réception (voir 2.7). Lorsque l'objet était retiré de son support, le signal était interrompu, et les temps de réponse pouvaient être enregistrés. L'Arduino Nano était connecté à un PC (Alienware R17) sous lequel la tâche était exécutée à l'aide de MATLAB et du Psychtoolbox. La tâche était projetée horizontalement sur la table d'expérience à l'aide d'un vidéoprojecteur suspendu verticalement au-dessus de la table (hauteur de la table = 70 cm).

Stimuli

Chaque objet et son support étaient placés à 30cm du point de fixation. Le flash lumineux rouge était un rectangle de 18cm*5cm. Le flash blanc un rectangle de 18cm*5cm. la flèche directionnelle une flèche de 5cm*1cm placée au centre à 2cm au-dessus du point de fixation. Le point de fixation avait une taille de 4*4cm. Pour les essais valides exogènes, le flash lumineux rouge et blanc était affiché sur le même objet. Pour les essais valides endogènes, la flèche indiquait le même objet que le flash blanc. Pour les essais invalides, l'indice indiquait l'autre objet que celui ciblé par le flash blanc.

Procédure

L'expérience consistait en une tâche de Posner dans laquelle les participants devaient prendre un objet le plus rapidement possible à gauche ou à droite d'un point de fixation central situé devant eux. Un flash lumineux rouge (cible) indiquait l'objet à prendre. Avant cette cible, un indice était fourni au participant (présentation de 200 ms). Il s'agissait soit d'un flash de lumière blanche sur l'un des deux objets, soit d'une flèche directionnelle gauche/droite située au-dessus du point de fixation central. Chaque indice a été présenté 40 fois. Ils indiquaient 30 fois la position correcte de l'apparition de la cible et 10 fois la mauvaise position (prédictivité

de 75%). Les participants avaient pour instruction de ne pas bouger les yeux pendant toute la durée de la tâche (orientation cachée) et d'utiliser l'indice pour déplacer leur attention. Le point de fixation était affiché pour une durée de 1500ms. Ensuite, l'indice apparaissait pendant 200ms. L'ISI était de 300 ms, puis la cible apparaissait pendant 200ms. Une fois la cible apparue, les participants prenaient l'objet ciblé en le retirant de sa base avec la main la plus proche. Avant chaque essai, un script automatique vérifiait que l'objet avait été remis sur son support. Avant la phase expérimentale, un entraînement composé de 8 essais pour chaque condition expérimentale était effectuée par les participants.

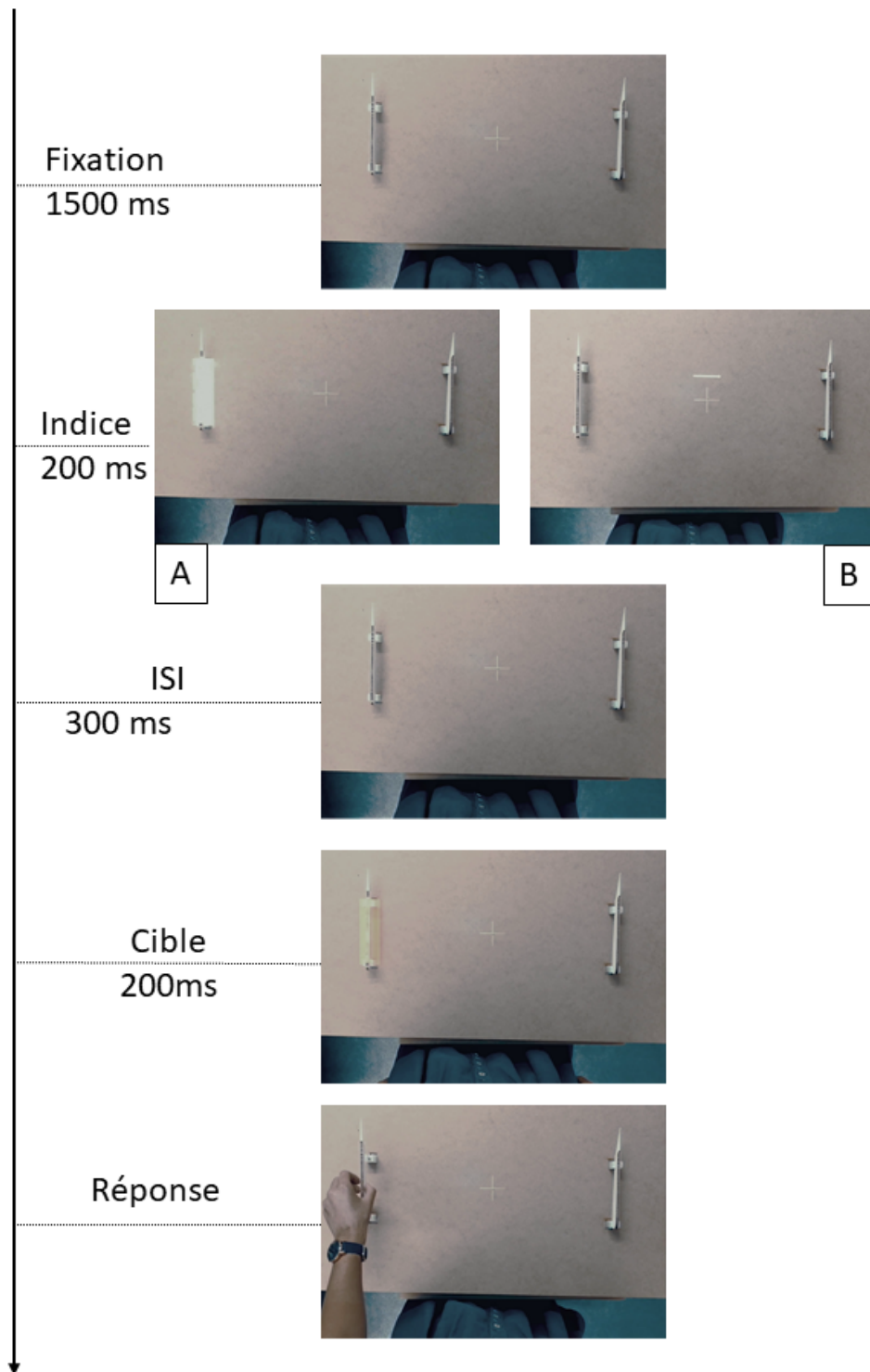
2.3.3 Résultats

Les résultats ont été analysés à l'aide des logiciels MATLAB et JASP. Nous avons observé les effets des facteurs validité des indices (valide/invalid) et types d'indices (endogène/exogène) sur les temps de réponse des sujets. L'ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs montre un effet principal de la validité des indices comme dans l'expérience originale de Posner, $F(1, 11) = 27.108, p = .0002, \eta^2 = 0.398$ Les indices valides ont produit des temps de réponse plus rapides que les indices invalides (MD = 77 ms). Nous observons également un effet marginal du type de repère, $F(1, 11) = 4,196, p = .065, \eta^2 = 0,103$. Les indices endogènes ont tendance à produire des temps de réponse plus rapides que les indices exogènes (MD = 39 ms). Il n'y a pas d'interaction, $F(1, 11) = 0,914, p = .360$.

2.3.4 Conclusion

La présente étude avait pour objectif de tester le paradigme de Posner en environnement réel lorsque les participants doivent effectuer une action complexe sur un objet tangible. Pour ce faire, nous avons utilisé une version modifiée du paradigme de Posner en réalité

augmentée projetée. Nous avons utilisé des indices visuels endogènes et exogènes. Les résultats ont montré un effet principal de la validité de l'indice comme dans les expériences originales (Posner, 1980). Lorsque l'indice indiquait le bon objet à prendre les participants ont effectué leur action plus rapidement que lorsque l'indice a indiqué le mauvais objet. Cela signifie que les indices ont permis aux participants d'orienter efficacement leur attention à l'endroit indiquer. Cette orientation à permis de prendre l'objet plus rapidement lorsque l'objet à prendre était celui où l'attention a été orientée. En revanche, lorsque l'attention a été orientée au mauvais endroit, les participants ont dû réorienter leur attention au bon endroit impactant la vitesse de préhension de l'objet. Ces résultats montrent que le paradigme de Posner, loin d'être un simple paradigme synthétique de laboratoire, produit des effets similaires dans un environnement réel où les utilisateurs doivent effectuer une action concrète sur des objets tangibles que sur passation expérimentale standard sur ordinateur de bureau. Il semblerait également que les indices endogènes permettent une meilleure orientation que les indices exogènes, mais l'effet est marginal et des études complémentaires sont nécessaires. En particulier en manipulant l'ISI qui devrait être adapté en fonction du type d'indice pour une orientation optimal. À notre connaissance, il s'agit d'une des premières expériences à reproduire ce paradigme avec effet de validité des indices dans la vie réelle avec des objets tangibles qui doivent être attrapés. Elle montre la nécessité de transférer les paradigmes expérimentaux hors du laboratoire et de les tester dans des environnements écologiques pour développer des applications concrètes. Il est ainsi possible d'imaginer des systèmes de réalité augmentée en ajoutant des informations par superposition pour guider les professionnels dans leur pratique. Plus précisément dans des environnements qui nécessitent souvent des réactions rapides et efficaces pour préserver la sécurité des personnes, comme les cockpits d'avions, les tours de contrôle du trafic aérien et les blocs opératoires.



100
 Figure 2.8. Déroulement d'un essai dans la tâche de Posner en réalité augmentée (de haut en bas). A : l'indice est exogène et valide. B : l'indice est endogène et invalide. ISI = intervalle inter-stimulus

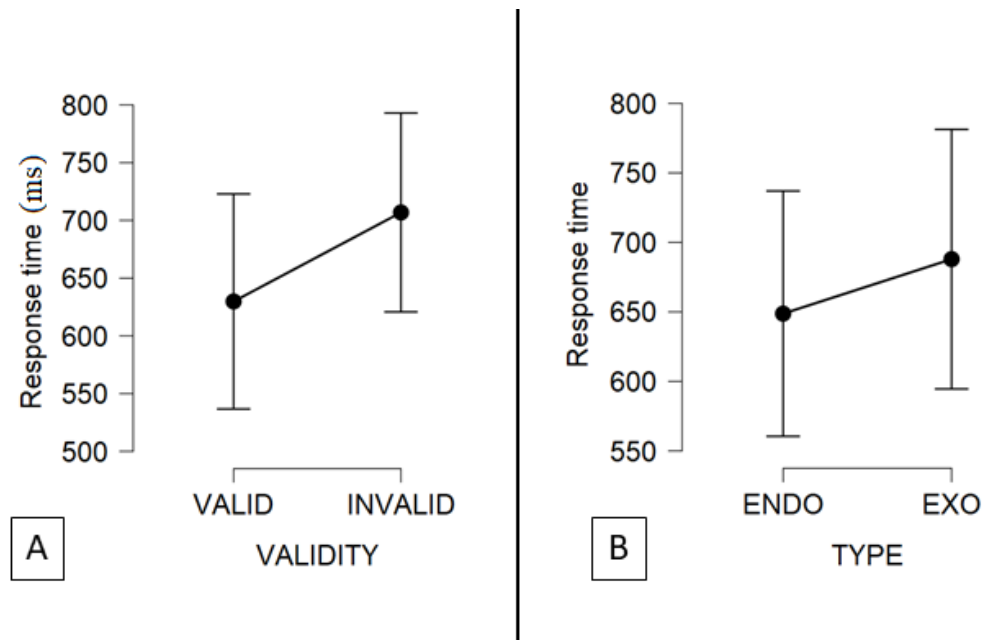


Figure 2.9. A. Temps de réponse moyen en fonction de la validité de l'indice (valide, invalide). B. Temps de réponse moyen en fonction du type d'indice (endogène, exogène) *** = $p < 0.001$

2.4 "The Posner Game"

2.4.1 Introduction

La maladie de Parkinson est la deuxième maladie neurodégénérative la plus fréquente (Mao et al., 2016). Elle affecte le système nerveux central ce qui entraîne des troubles progressifs tels que mouvements ralentis, tremblements et trouble cognitif. La maladie de Parkinson est souvent connue pour les troubles moteurs qu'elle implique. L'on associe ainsi souvent Parkinsonien et tremblement. Mais la maladie de Parkinson touche également des processus cognitifs comme les fonctions exécutives, l'attention focalisée et l'attention divisée (Dujardin, Sockeel, et al., 2007) dès le début de la maladie et même la mémoire de travail, épisodique et procédural (Mahieux et Fénelon, 2006, Dujardin, Sockeel, et al., 2007). Les fonctions attentionnelles visuospatiales peuvent également être impactées par la maladie (Rodríguez-Ferreiro, Cuetos, Herrera, Menéndez, & Ribacoba, 2010), mais les données sont discordantes. L'une des raisons supposées de cette atteinte des fonctions visuospatiales étant un trouble perceptif précoce (Mahieux et Fénelon, 2006 ; Dujardin, Defebvre, & Destée, 2007). Le paradigme de Posner étant un test de fonction attentionnelle visuospatial, il pourrait permettre de détecter des troubles attentionnels précoces dans la maladie de Parkinson. En effet l'on sait que dans la maladie de Parkinson, des troubles cognitifs peuvent être détectés en l'absence de démence avérée (Aarsland & Kurz, 2010; Mamikonyan et al., 2009; Rodríguez-Ferreiro et al., 2010). Mais les patients ont du mal à adhérer à ce genre de test et sont rarement motivés pour leur réalisation, notamment pour des tests longs, répétitifs et peu engageants comme peut l'être le paradigme de Posner.

La particularité d'utiliser un environnement familier et des objets du quotidien afin de gagner en validité écologique, rend la tâche de Posner que nous avons utilisé en réalité virtuelle plus motivante pour les participants. En effet, il effectue une tâche aux objectifs

plus concrets et compréhensibles qu'une tâche classique de Posner composé de simple forme qui clignote sur un écran. Les patients notamment âgés sont rarement motivés pour une tâche classiquement monotone, longue et ennuyeuse. Faire gagner en validité écologique le paradigme de Posner c'est aussi le rendre plus intéressant en lui donnant un objectif concret pour les participants, qui ne sont plus simplement un perdu face à l'intérêt d'une tâche, qu'il effectue sans réel engagement, quand ils veulent bien l'effectuer. Sans un regard de chercheur, le paradigme de Posner peut en effet paraître étrange et mystérieux. La motivation pour des passations expérimentales souvent très longues baisse rapidement. En revanche, en créant une version de bureau écologique du paradigme de Posner, dans une tâche telle que la préparation d'un sandwich, apporte un intérêt de l'expérience pour le participant. Son but n'est donc plus simplement de répondre vite à un stimulus, sans signification particulière, flasher sur un écran. Mais, de réussir à construire un sandwich le plus rapidement possible afin de respecter la cadence qu'oblige une enseigne de restauration rapide. La tâche raconter une histoire, implique davantage les participants et ressemble d'avantage à un jeu qu'à une expérience scientifique pour les sujets. Ce changement au demeurant insignifiant trouve une utilité particulière lorsque l'on souhaite étudier des patients souvent âgés et atteint de maladie neurodégénérative. S'il est bien un public qui ne s'accommode guère des expériences et des tests, c'est bien celui-ci. Jouer avec la frontière entre expériences scientifiques et jeu vidéo permet d'atteindre à public peut concerner et peu impliqué dans des paradigmes classiques de laboratoire non écologique. Cela ouvre la porte à des implications cliniques concrètes telles que par exemple l'aide au dépistage précoce de la maladie de Parkinson.

En collaboration avec l'université de Tel Aviv et le centre médicale Sourasky de Tel Aviv nous avons conçu une tâche informatisée en environnement écologique, où les participants se sont vus présenter une version modifiée du paradigme de Posner. Dans notre paradigme modifié, les participants devaient assembler un sandwich en choisissant les ingrédients

indiqués - une option parmi quatre. Il devait s'aider d'un indice qui pouvait être neutre, valide ou invalide afin de répondre le plus rapidement possible. Nous avons utilisé des indices visuels, exogène et endogène. Nous nous attendions à un effet de validité de l'indice comme dans tout paradigme de Posner. Cette étude étant exploratoire, aucune autre hypothèse a posteriori n'a été avancé.

2.4.2 Méthode et Procédure

Au début de chaque essai, un point de fixation apparaissait pour une durée variable entre 1500ms et 2500s. Dans la majorité des essais, la fixation était suivie par un indice, puis, après un délai supplémentaire, la cible était affichée à l'un des quatre emplacements possibles. Les participants devaient indiquer par une pression sur le clavier (en utilisant les deux mains) l'emplacement de la cible aussi rapidement et précisément que possible. Trois types d'indices précédaient le stimulus cible. Les indices neutres (signalant tous les emplacements spatiaux possibles) étaient des indices temporels, n'offrant aucune information spatiale. Les indices valides et invalides fournissaient à la fois des informations temporelles et spatiales (emplacement). Un indice valide indique correctement l'emplacement de la cible et un indice invalide indique un emplacement erroné. Dans une quatrième condition (sans indice), aucun indice ne précédait la cible. Les indices utilisés dans notre paradigme pouvaient également se comporter différemment, en déclenchant une orientation exogène ou endogène de l'attention. Nous avons conçu la tâche en deux blocs séparés (endogène et exogène) avec une courte pause au milieu.

Dans le bloc endogène, un indice central - une flèche directionnelle - était présenté pendant 100 ms, suivi d'un point de fixation (ISI) de 400 ms, de l'apparition de la cible pendant 500 ms et d'une durée de fixation qui variait aléatoirement entre 1500 et 2500 ms jusqu'à l'essai suivant. Cette partie comprenait 192 essais, avec une distribution prédictive impliquant

108 essais valides et 28 essais invalides ce qui donne un ratio de 80% d'indices spatiaux valides contre 20% d'indices invalides. Il y avait également, 28 essais neutres, et 28 essais sans indices après cette phase prédictive. Le bloc exogène était composé d'un indice de localisation - une boîte clignotant à l'un des quatre emplacements possibles de la cible - avec les mêmes conditions que dans la section endogène, à l'exception d'un SOA à 400 ms pour 128 essais et 800 ms pour 64 essais afin d'explorer les effets d'une inhibition de retour (pour un SOA de 800ms) et d'une distribution non prédictive qui donne un ratio d'indices spatiaux de 50% valides contre 50% invalides.

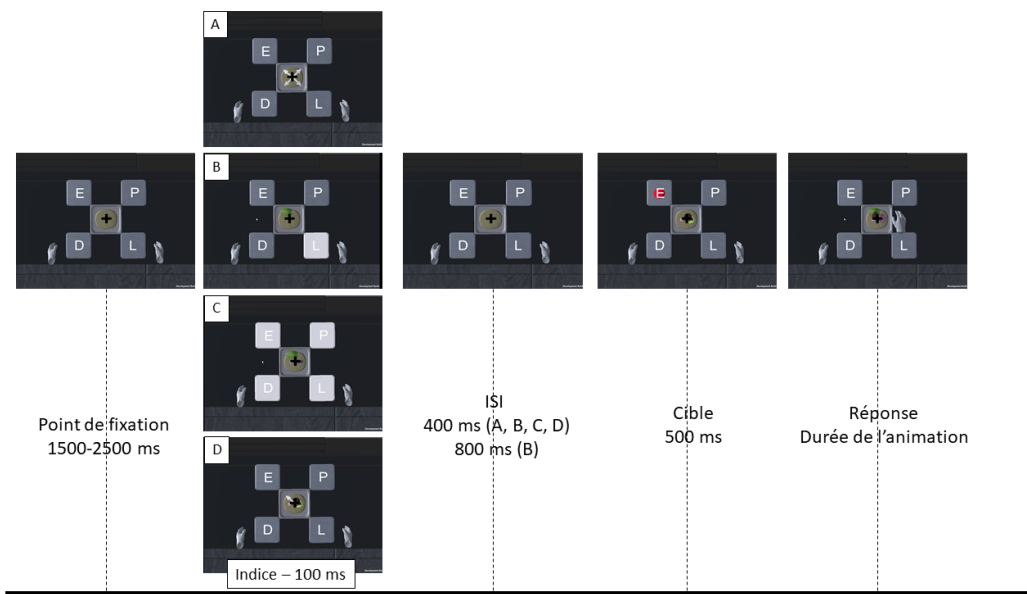


Figure 2.10. Déroulement d'un essai (de droite à gauche). A. Indices endogène neutre ; B. Indice exogène invalide ; C. Indice exogène neutre ; D. Indice endogène valide. ISI = intervalle inter-stimulus (400ms pour tous les indices, 400 et 800 ms pour les indices exogènes)

Les passations expérimentales étant toujours en cours, car l'effectif de l'expérience est

particulièrement important (300 patients vs 300 personnes en bonne santé). Les résultats et conclusions de cette expérience ne sont donc pas encore disponibles. Un essai sur 100 personnes (50 par groupe) est actuellement en cours.

2.5 Conclusion générale du Chapitre

Dans cette partie de la thèse, nous avons développé et testé des versions plus écologiques du Paradigme de Posner grâce à des technologies émergentes comme la réalité virtuelle et la réalité augmentée. Ainsi, nous avons augmenté la validité écologique de ce paradigme expérimental exclusivement étudié en laboratoire. Nous avons pu montrer que ce paradigme, qui permet d'étudier les processus d'orientation de l'attention et de mesurer l'efficacité de stimuli perceptive à orienter l'attention, est un paradigme robuste et transférable dans un environnement proche d'un environnement naturel. En effet, dans nos différentes expériences, nous avons pu constater que des indices endogènes, exogènes, auditifs et visuels permettent d'orienter efficacement l'attention lorsqu'ils fournissent une information fiable sur la région de l'espace qu'occupera une information à traiter. Ces résultats ont été observés aussi bien réalité virtuelle que dans la vie réelle grâce à l'utilisation de la réalité augmentée projetée. L'on a pu constater que cet effet de validité persistait lorsqu'une réponse motrice, plus élaborée qu'un simple appui touche sur un clavier ou une souris, était demandée aux participants. Ceci, aussi bien lors d'interaction avec des objets virtuels en trois dimensions qui représente des objets du quotidien, qu'avec des objets réels. Cela montre que le Paradigme de Posner, loin d'être un simple paradigme synthétique de laboratoire, produit des effets lors de la réalisation d'activité dans le monde réel. De plus, faire gagner en validité écologique ce paradigme énormément utilisé dans l'étude des mécanismes cognitifs d'orientation visuospatial s'est avéré une approche plus intéressante même en laboratoire. Notamment dans le cadre d'une approche clinique d'évaluation des capacités visuospatiale, qui fait appel à des populations spécifiques, qui ont souvent beaucoup de difficulté avec les tests cognitifs standard peu engageants, comme les malades atteints de la maladie de Parkinson.

Toutes ces études permettent d'envisager le transfert de ce paradigme pour des perspectives

applicatif et clinique. Notamment, pour les systèmes destinés à guider l'attention des individus en temps réel afin d'améliorer la sélection attentionnelle en permettant un guidage des déplacements de l'attention aux endroits pertinents lors de l'activité en cours. Par exemple, en concevant des systèmes de guidage via l'utilisation de projecteur afin de guider les pilotes, les contrôleurs aériens ou encore les chirurgiens lorsqu'une information importante doit subir un traitement prioritaire. L'on pourrait ainsi leur permettre de réagir plus efficacement en utilisant leurs capacités à orienter leur attention afin de mieux traiter l'information. Par exemple, l'on pourrait indiquer aux assistants de chirurgien l'outil adéquat qu'il devra fournir au chirurgien en lui indiquant via un système d'indice par projection. On sait en effet que dans une situation d'urgence, se tromper d'outil et devoir recherche un nouvel outil peut-être délétère pour la survie du patient. Mais l'on peut également envisager des alarmes visuelles, qui en plus de prévenir les pilotes qu'un instrument de bord doit être traité, lui indiquerait quel instrument ou quel autre élément du cockpit nécessite une intervention ou une vérification. Ou encore, indiquer au contrôleur aérien l'apparition d'un événement important et des éléments qu'il devra prendre en compte prioritairement pour assurer le bon déroulement du trafic. Il reste cependant un défi majeur pour ce genre de système, comme le soulignais déjà Booth, 2014, déterminer ce à quoi la personne est en train de faire attention. Mais il existe un défi sans doute plus grand encore, déterminé ce à quoi la personne devra faire attention. Une collaboration étroite entre des experts en science de la cognition et en intelligence artificielle pourrait peut-être permettre de relever ce défi difficile.

Si gagnée en validité écologique est déjà une grande avancée dans le domaine d'étude de l'orientation de l'attention et que cela ouvre de nombreuses perspectives de recherche et d'application. Il nous manque encore une dimension fondamentale afin d'élargir les perspectives applicatives du paradigme de Posner et les potentiels découvertes sur les processus d'orientation de l'attention : la prise en compte de l'environnement visuel complet

de l'individu issu des représentations qu'il a créé lors de l'exploration de son environnement. Cette représentation visuelle interne qui dépasse le FOV de l'individu et qui s'étend tout autour de lui est très probablement impliquée dans les processus d'orientations de l'attention. En effet, dans la vie de tous les jours nous avons souvent à orienter notre attention vers des événements que l'on ne voit pas directement, mais qui surviennent en dehors du champ visuel frontale. En particulier, lorsqu'un événement survient derrière nous et que nous devons alors nous retourner. Est-il alors possible d'utiliser le paradigme de Posner pour étudier les mécanismes d'orientation de l'attention lorsque l'individu doit déplacer son attention derrière lui ? C'est cette question que nous étudierons dans la deuxième partie de cette thèse.

3 Le paradigme de Posner à 360°

3.1 Introduction générale

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. La réalité virtuelle permet de faire gagner en validité écologique les paradigmes expérimentaux utilisés en science cognitive en proposant un environnement immersif en trois dimensions avec lequel les utilisateurs pourront interagir d'une manière proche de ce qu'il expérimente au quotidien. De plus, nous avons également vu que la réalité virtuelle permet de simuler la totalité des champs visuels des sujets (FOR) en offrant 3DOF ou 6DOF. Elle permet donc d'étudier l'orientation de l'attention envers des stimuli qui peuvent émaner n'importe où dans l'environnement du sujet et non plus simplement sur un écran d'ordinateur placé devant les participants (paradigme 2D). On dira qu'elle permet une vision panoramique à 360°. L'idée de ce chapitre est donc d'explorer l'orientation de l'attention à 360°, c'est-à-dire lorsque l'attention doit être déployée en dehors de l'espace frontale et en particulier dans l'espace arrière.

Pour comprendre et aborder ce chapitre, il est nécessaire de bien comprendre comment fonctionne les mécanismes de l'orientation de l'attention. Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, il existe deux processus principaux qui sont l'engagement de l'attention vers une région de l'espace prédéfini (celle indiquée par l'indice) puis le désengagement de l'attention si nécessaire pour se réengager vers une autre région de l'espace (la réorientation

vers la cible). Lorsqu'un indice prédit correctement la région de l'espace que va occuper la cible, il n'y a pas nécessité de réorientation puisque l'attention des participants est orienté au bon endroit. Tandis que lorsque l'indice engage l'attention vers une autre région de l'espace que celui qui va contenir la cible, il y a nécessité de se réorienter et de se diriger vers la position effective de la cible. Nous avons vu dans la première expérience de cette thèse que la sélection de la région de l'espace qui devait subir un traitement prioritaire pouvait se baser sur les objets ou sur une région de l'espace elle-même. Un autre aspect que nous devons alors considérer est la manière que nous avons de coder cette espace. Si l'on considère une orientation basée sur une région de l'espace. Comment s'effectue cette sélection ? Autrement dit, comment codons-nous l'information spatiale qui nous entoure et comment récupérons-nous cette représentation de l'espace afin de définir l'emplacement ou nous devons nous orienter ?

Nous savons que nous utilisons deux cadres de référence différente pour nous représenter l'espace qui nous entoure. L'un axé sur l'individu lui-même et l'autre axé sur les objets de cet environnement (Klatzky, 1998; Paillard, 1971). Dans un cadre de référence spatiale basé sur l'individu lui-même, ou égocentrique, l'on code les informations spatiales en fonction de notre propre position dans l'espace. Ainsi si nous nous déplaçons, ce codage est réactualisé par rapport à notre position actuelle. En revanche, dans un cadre de référence axé sur les objets ou allocentrique, la position des objets dans l'espace est codé indépendamment de notre propre position. Les informations spatiales sont codé en fonction de la place que chaque objet occupent les un par rapport aux autres. Ainsi, dans ce cadre de référence si nous nous déplaçons, nous sommes capables de dire où se trouve chaque objet indépendamment de notre propre position. Nous savons que le codage relatifs à ces deux cadres de références sont localisé dans des régions cérébrales distinctes (Tabareau, Bennequin, Berthoz, Slotine, & Girard, 2007). Ces deux cadres références produisent des représentations de l'espace

différentes. Une représentation de l'espace égocentrée et une représentation de l'espace allo centré.

Revenons alors au paradigme de Posner et à la manière dont nous avons de sélectionner la région de l'espace où l'attention doit être orientée. L'on pourrait alors définir le **schéma de traitement suivant pour les essais valides** :

Perception de l'indice → sélection de la région de l'espace à privilégié → engagement de l'attention vers cette espace → apparition de la cible → traitement de la cible.

Les **essais invalides** fonctionneraient selon un schéma similaire :

Perception de l'indice → sélection de la région de l'espace à privilégié → engagement de l'attention vers cette espace → apparition de la cible → désengagement de l'endroit de l'espace présélectionné → réengagement vers la position effectif de la cible → traitement de la cible.

L'étape qui nous intéresse ici est la sélection de la région de l'espace à privilégié. Nous savons que l'orientation de l'attention peut se faire au sein de représentation mentale (Lepsien et al., 2005). Ces représentations contiennent des informations qui nous servent à évoluer dans notre environnement comme la localisation des objets dans l'espace qui nous entoures. Cette localisation des objets est dans la majorité des cas déterminé à partir d'information visuelle récupérer lorsque nous avons exploré notre environnement. Il existe donc un système de représentation de l'espace visuelle qui s'étend bien au-delà de l'espace directement perçu par nos yeux à un moment donnée. L'on peut alors supposé qu'il est possible d'orienter l'attention d'une personne en dehors de l'espace directement perçu, devant elle, afin de l'aider à préparer le traitement d'une information contenue ou susceptible d'être connu autre part dans son environnement (à 360°). Pour ce faire, elle piochera très probablement dans

son système interne de représentation de l'espace afin de sélectionner la région de l'espace à privilégier afin d'orienter son attention et d'anticiper le traitement de cette cible "cachée".

Cette question de l'orientation de l'attention en champs perceptifs étendue (à 360°) est l'objet de ce chapitre. Nous avons effectué une première expérience afin de déterminer quelle modification du paradigme de Posner était possible dans cet objectif. Nous avons dû relever plusieurs défis méthodologiques. Le premier défi est inhérent au fait que pour traiter une information visuellement lorsqu'elle n'est pas présente actuellement dans notre champ de vision, nous devons nous retourner et donc bouger la tête. Hors, introduire des mouvements de la tête dans la comparaison des processus de traitement de l'information dans l'espace frontale et arrière biaiserai indiscutablement nos résultats puisque ces mouvements ne sont pas nécessaire dans l'espace avant. En d'autres termes, les temps de réponses seraient forcément plus long pour le traitement des cibles qui nécessite un mouvement. Pour déterminer une méthode d'étude optimale, nous avons utilisé la réalité virtuelle afin de tester deux design expérimentaux destinés à répondre à cette problématique (traduction de l'article Soret, Charras, Khazar, Hurter, & Peysakhovich, 2020. Une troisième expérience viendra répliquer la deuxième expérience avec quelque modification afin d'affiner nos résultats et nos conclusions et de corriger certaine limite de la première version (en cours de soumission pour le journal Vision édition spéciale "Eye Tracking in Human-Computer Interaction"). Enfin, une quatrième expérience clôture ce chapitre et propose une modification du paradigme de Posner dans sa version expérimentale classique afin d'étudier l'orientation de l'attention dans l'espace arrière pour des études expérimentales en laboratoire (soumis en temps que "Registered Report" pour le journal "Scientific Report").

3.2 Paradigme de Posner à 360° en réalité virtuelle

3.2.1 Introduction

Dans la vie quotidienne, les gens ont tendance à concentrer leur attention sur une zone relativement petite du champ visuel frontal (devant la personne). Par conséquent, les études sur l'orientation attentionnelle visuelle et auditive se sont largement concentrées sur l'orientation dans l'espace frontal (Driver & Spence, 1994; McDonald & Ward, 1999; Mondor & Zatorre, 1995; Posner, 1980; Spence & Driver, 1997). Les études sur l'orientation dans l'espace arrière (en dehors du champ visuel et généralement dans l'espace arrière) sont beaucoup moins courantes. La raison de cette absence d'études dans l'espace arrière est une hypothèse implicite selon laquelle les résultats obtenus dans l'espace frontal pourraient être généralisés à l'espace arrière (Spence et al., 2017). Néanmoins, il semble que la perception et la réaction aux stimuli dans l'espace arrière soient différentes de ce qui est observé dans l'espace frontal. Par exemple, Ho and Spence (2005) ont utilisé des indices tels que des klaxons ou des indications verbales («avant «arrière «droite) pour attirer l'attention d'automobiliste sur un événement important (une voiture ralentissant devant le conducteur ou accélérant derrière lui, nécessitant une accélération ou un freinage). Comme le conducteur ne pouvait pas se retourner, la vue de l'espace visuel arrière était visible à travers un rétroviseur. Les résultats montrent que lorsque l'indice était présenté devant la personne, les temps de réponse étaient plus courts lorsque l'événement important apparaissait sur le pare-brise (à l'avant) plutôt que sur le rétroviseur (à l'arrière). Même si visuellement, les cibles ont en fait toutes été présentées dans l'espace avant. L'étude de Ho et Spence 2005 suggère donc que lorsqu'un stimulus est identifié comme provenant de l'espace arrière, il n'est pas lié aux mêmes mécanismes d'attention que lorsqu'il est identifié comme provenant de l'espace avant, même si, l'information est présentée devant le sujet (réflexion miroir). Soret et al. (2019) ont

montré qu'en utilisant une version modifiée du paradigme de Posner, il est possible d'évaluer l'efficacité de différents stimuli perceptifs (cues) utilisés pour orienter l'attention dans un environnement immersif et écologique. Dans la lignée de cette recherche, notre étude visait à comprendre si la manipulation de l'orientation endogène en utilisant des indices auditifs et visuels pouvait améliorer le traitement des informations visuelles dans un environnement immersif où les informations à traiter peuvent être perçues à 360°. Pour ce faire, nous avons conçu deux expériences de réalité virtuelle distinctes afin d'évaluer la fiabilité de deux versions modifiées de la tâche de Posner pour l'étude de l'orientation attentionnelle à 360 degrés. Nous supposons que tous les indices vont produire des temps de réponse plus rapides lorsqu'ils fournissent des informations fiables sur la localisation de la cible (indices valides) plutôt que des informations erronées (invalides). Mais, cet effet de validité pourrait être modulé selon la modalité utilisée et la localisation des informations entrantes (devant ou derrière la personne). Au regard de la littérature existante, les TR devraient être plus courts lorsque la cible apparaît devant le participant plutôt que derrière (Ho & Spence, 2005; Spence et al., 2017) et les indices auditifs devraient donner des TR plus courts que les indices visuels (Fernandez-Duque & Posner, 1997). Nous supposons également, à l'instar, des résultats classiques du paradigme de Posner. Les indices valides devraient produire des temps de réaction plus courts que les indices neutres, qui à leur tour devraient être plus courts que les indices non valides. En outre, l'ampleur de ces différences peut varier en fonction de l'emplacement de la cible (avant/arrière) et de la modalité (visuelle/auditive). Nous supposons que les indices visuels seront les plus efficaces dans l'espace frontal (Chica et al., 2007; Schmitt, Postma, & De Haan, 2000), suivi de près par les indices auditifs (Driver & Spence, 1998; Tilak et al., 2008). Les indices auditifs pourraient également être plus efficaces que les indices visuels intra-modaux dans l'espace arrière (Ho & Spence, 2005; J. Lee & Spence, 2015).

3.2.2 Attention à la Navette

3.2.2.1 Méthode

Participants

Trente-trois sujets (7 femmes, âge moyen : $21 \pm SD$), étudiants de l'institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE-SUPAERO, Toulouse), se sont portés volontaires pour participer à l'étude. Conformément à la Déclaration d'Helsinki, tous les participants ont donné leur consentement écrit avant l'expérience. Ils n'ont reçu aucune contribution pour leur participation.

Matériel

Nous avons utilisé un casque de réalité virtuelle HTC Vive avec un système d'eye-tracking Tobii intégré. Le casque est composé d'un écran double AMOLED de 3,6" de diagonale, d'une résolution de 1080×1200 pixels par œil (2160×1200 combinés) avec un taux de rafraîchissement de 90 Hz et un champ de vision de 110° (145° en diagonale). Les participants ont utilisé les contrôleurs standard du HTC Vive pour interagir avec l'environnement. Le système de poursuite oculaire a une fréquence de sortie des données du regard (binoculaire) de 120 Hz avec une précision estimée à 0.5° . Le champ de vision du système de suivi du regard est de 110° (champ de vision complet du HTC Vive). Le matériel expérimental consistait en une version modifiée du paradigme de Posner développée à l'aide du moteur de jeu Unity3D supportant la programmation C# et les plugins nécessaires à la réalité virtuelle (OpenVR et SteamVR) ainsi que le plugin nécessaire au suivi oculaire Tobii, Tobii Pro SDK.

Stimuli

Les participants ont été placés dans un environnement spatial virtuel où se trouvait une plateforme sur laquelle les participants pouvaient se tenir debout. Devant eux, la station spatiale

internationale et autour d'eux une ceinture d'astéroïdes (figure 1). Lorsque le participant regardait la Station spatiale internationale, une barre de progression radiale apparaissait et servait de point de fixation.



Figure 3.1. Instantané de l'environnement virtuel utilisé dans l'expérience 4. A : Point de fixation ; B : Cible

Deux types d'indices ont été utilisés : des instructions vocales (indices auditifs endogènes) et des instructions écrites (indices visuels endogènes). Les instructions étaient constituées de trois mots indiquant la position : (devant, derrière) \times (Haut, Bas) \times (Gauche, Droite). Par exemple, devant en haut à droite. Les informations fournies par les indices visuels et auditifs étaient identiques. Toutes les instructions avaient une durée de présentation de 1,7s. Les instructions écrites étaient affichées dans une police blanche devant la Station spatiale internationale (ISS).

Les cibles étaient des navettes spatiales de différentes tailles, de $11^\circ \times 9^\circ$ à $27^\circ \times 14^\circ$. La cible se trouvait systématiquement en dehors du champ visuel et induisait des mouvements de tête d'amplitude équivalente. La cible pouvait apparaître à 8 positions différentes selon

les instructions. Si l'on considère comme point de départ une position neutre de la tête (regardant droit devant), l'espace frontal s'étend de 90° à gauche et de 90° à droite. Le champ de vision étant de 110° (55° de chaque côté), les cibles frontales étaient présentées à environ 70° à droite ou à gauche. Les cibles arrière ont été présentées au-delà de la ligne de front à un angle d'environ 107° à gauche ou à droite. Les positions supérieure et inférieure ont été perçues à un angle vertical de 30° vers le haut ou vers le bas à partir d'une position neutre de la tête (angle vertical maximum de 100°, 50° vers le haut, 50° vers le bas). Le point de fixation central était la barre de progression radiale de diamètre 18°

Pour les essais valides, l'instruction vocale indiquait la position effective de la cible. Pour les essais invalides, seule la position verticale de la cible (haut/bas) était manipulée pour éviter une recherche active de la cible après l'apparition de l'indice. En effet, l'apparition de la cible a été programmée de sorte que les positions verticales possibles opposées soient simultanément visibles dans le champ de vision du sujet. En d'autres termes, si pendant un essai invalide, l'indice indique l'apparition de la cible devant en haut à gauche. La cible apparaîtra devant en bas à gauche et sera directement visible par le sujet. Il n'aura donc pas à rechercher la position réelle de la cible, ce qui conduirait inévitablement à des TR plus lents dans cette condition.

Procédure

Après avoir rempli un formulaire de consentement, les participants remplissaient un questionnaire préliminaire et lisaient la fiche d'information contenant différentes instructions. Les instructions principales étaient de détruire la cible le plus rapidement possible en utilisant l'indice fourni. Les participants avaient pour instruction de détruire le plus rapidement possible la cible (navettes spatiales). Ils ont été informés qu'un indice indiquant l'emplacement le plus probable de la cible leur serait fourni et qu'ils devraient utiliser cet indice pour réagir aussi

rapidement que possible. Ils ont également été informés que dans 25% des cas, les indices ne fourniraient pas l'emplacement exact de la cible, mais qu'ils devaient tout de même s'en servir pour réagir le plus rapidement possible. De plus, les participants étaient informés que lorsque l'indice était invalide, la cible apparaîtrait en haut ou en bas de l'emplacement fourni par l'indice et qu'ils n'avaient donc pas besoin de chercher la cible dans d'autres parties de l'espace. Enfin, les participants étaient informés qu'ils devaient fixer le point de fixation (sur le HUD) jusqu'à ce que d'une navette (la cible) soient visibles. Si les participants déplaçaient leurs yeux trop tôt, l'essai était annulé et un nouvel essai était généré. Avant la phase d'entraînement. L'expérimentateur s'est assuré que les instructions étaient bien comprises par le participant. Pendant la phase d'entraînement, chaque indice et chaque emplacement de la cible étaient affichés au moins une fois. Trois indices invalides ipsilatéraux étaient présentés pour clarifier cette situation particulière. Une fois l'entraînement terminé, la phase expérimentale était lancée. Au début de chaque essai, les participants devaient fixer le point de fixation jusqu'à ce que la barre de progression soit pleine (1,5s nécessaire pour le faire). Ensuite, un indice apparaissait en fonction des conditions expérimentales pendant 1,7s. Après un intervalle interstimulus (ISI) de 500 ms, la cible apparaissait à l'un des emplacements possibles en fonction des conditions expérimentales. Les participants devaient alors détruire la cible en la regardant et en appuyant sur la gâchette de la manette de jeu. Après la destruction de la cible par le participant, un intervalle de 1.5.s était respecté avant le prochain essai. L'ISI a été établi en tenant compte du fait que nous n'étudions que des processus endogènes. En effet, certaines études ont montré que les bénéfices produits par l'orientation volontaire sont obtenus après un intervalle minimum de 300ms dans la plupart des cas (Chica et al, 2014). Afin de nous assurer que l'orientation volontaire puisse être déployée par les participants, nous avons choisi un ISI plus important. Cette phase expérimentale était composée de 50 essais, dont 25 essais avec un indice auditif et 25 essais

avec un indice visuel. Pour chaque type d'indice, nous avons 20 essais valides et 5 essais invalides (75% de validité). Sur les 50 essais totaux, 25 essais orientaient l'attention du participant devant et 25 derrière. L'ensemble de l'expérience a duré 15 minutes.

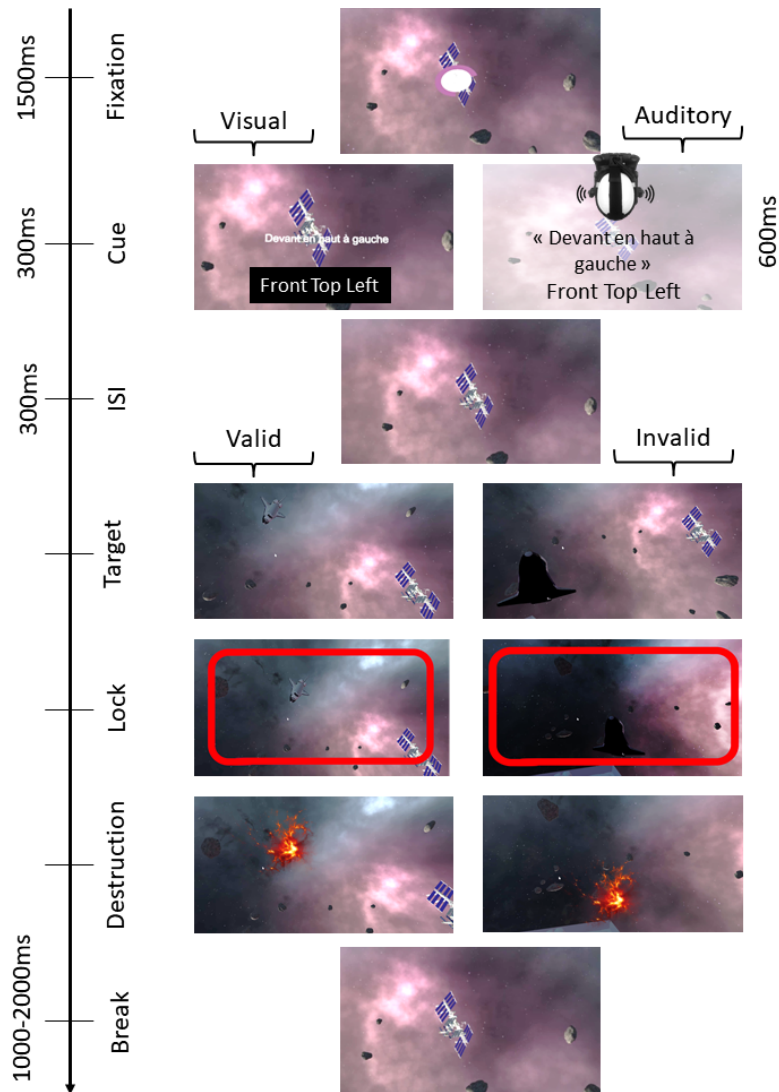


Figure 3.2. Déroulement d'un essai (de haut en bas) de la 4ème expérience

Variable dépendante

Tous les temps de réponse oculaires (expériences 1 et 2) ont été obtenus en utilisant un "raycast" (un rayon invisible allant en ligne droite) qui suit la position et la direction des yeux des participants (déterminées par le système d'eye-tracking intégré au casque) et qui déclenche l'enregistrement du TR lorsqu'il rencontre un objet prédéfini dans la scène (ici la cible).

Nous avons enregistré deux RT différents : une réponse motrice et une réponse oculaire. Le RT moteur, appelé Destruction du Vaisseau, était le temps entre la fin de l'apparition des indices et la destruction de la navette par pression sur une touche du contrôleur. Le temps de réponse oculaire, appelé Regard sur Navette, était l'intervalle de temps entre la fin de l'apparition des indices et le moment où le participant regarde la cible (ou le "raycast" traverse la cible).

3.2.2.2 Résultats

Nous avons effectué une analyse statistique pour comprendre l'effet des indices sur les TR des sujets en fonction de l'emplacement spatial de la cible, de la validité de l'indice et de la modalité de l'indice. L'analyse comprend $49,8 \pm 2,8$ essais par participant pour les TR de la Destruction du Vaisseau et $49,9 \pm 1,9$ essai par participant pour les TR de Regard sur Navette. Nous avons utilisé le logiciel JASP pour effectuer une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées à 3 facteurs sur les TR moyens pour chaque variable dépendante (Destruction du Vaisseau et Regard sur Navette) afin d'observer l'effet des facteurs manipulés : Validité (valide/invalid), Modalité (visuelle/auditive) et Localisation (avant/arrière). Le test LSD de Fisher a été utilisé pour les comparaisons post-hoc. Le même schéma de résultats a été observé pour Destruction Navette et Regard Navette. Par souci de clarté, nous ne présentons que les TR de Destruction Navette.

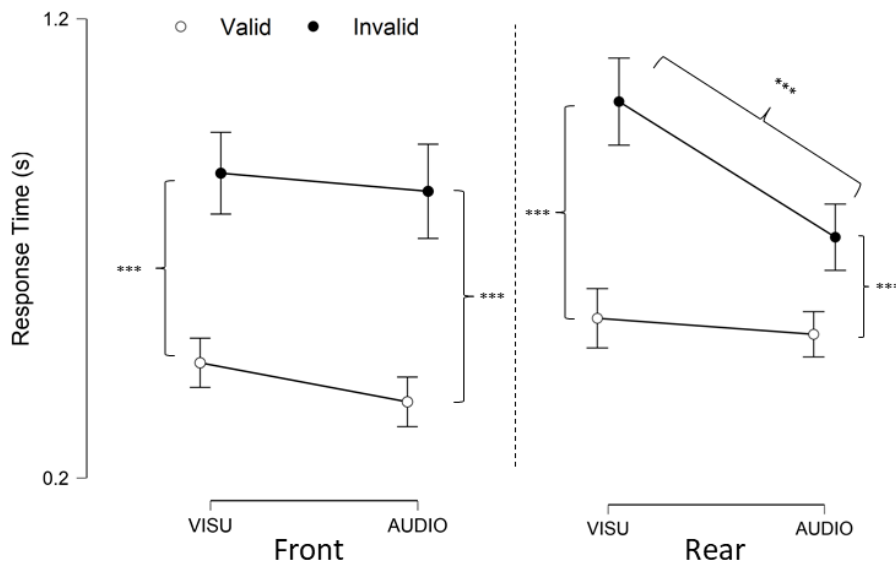


Figure 3.3. Temps de réponse moyen pour "Regard Navette" en fonction de la validité, de la modalité de l'indice et de la localisation de la cible.

* = $p < .05$, ** = $p < .01$, *** = $p < .001$

Comme prévu, l'analyse a révélé un effet principal significatif de la validité de l'indice, $F(1, 32) = 185.7, p < .001, \eta^2 = 0.85$. Les TR des sujets étaient significativement plus courts lorsque l'indice était valide que lorsque l'indice était invalide (MD = 387ms). De plus, nous avons observée un effet principal de la modalité de l'indice, $F(1, 32) = 11.2, p = .002, \eta^2 = 0.26$. Comme attendu, les TR des sujets étaient significativement plus courts lorsque les indices étaient auditifs plutôt que visuels (MD=113ms). Enfin, l'analyse a montré un effet principal significatif de la localisation de l'indice, $F(1, 32) = 7.4, p = .01, \eta^2 = 0.19$. À l'instar des résultats obtenus par Spence et al., 2017, les participants ont obtenu des TR significativement plus courts lorsque la cible apparaissait devant plutôt que derrière (MD=78ms).

Cependant, il existe une interaction significative entre nos trois facteurs manipulés :

validité, modalité et localisation, $F(1, 32) = 11.35, p = .002$. L'analyse de l'effet simple de la validité en fonction de la localisation et de la modalité a montré un effet de la validité de l'indice dans toutes les modalités de tous les autres facteurs manipulés (tous $p < .0001$) mais l'effet de "cueing" (différence de TR entre les essais invalides et valides) varie en fonction de la modalité de l'indice et de la localisation de la cible. Lorsque la cible est apparue devant, l'effet d'indiçage (cueing effect) semble similaire pour la modalité visuelle et la modalité auditive. En revanche, lorsque la cible apparaissait à l'arrière, l'effet d'indiçage était plus important pour la modalité visuelle que pour la modalité auditive. De plus, l'analyse de l'effet simple de la modalité en fonction de la validité et de la localisation a montré que les temps de réponse étaient significativement plus courts pour les indices invalides auditifs que pour les indices invalides visuels à l'arrière uniquement, voir la figure 3.3.

Afin de mieux comprendre cette interaction. Nous avons calculé l'effet d'indiçage (cueing effect) en soustrayant les TR des participants en conditions valides des TR en conditions invalides pour chaque condition. Nous avons ensuite réalisé une nouvelle analyse de variance à mesure répétée (RMANOVA) de l'effet d'indiçage en fonction des facteurs manipulés : localisation (avant/arrière) et modalité (visuelle/auditive). Cette nouvelle analyse révèle une interaction significative entre l'emplacement et la modalité sur l'effet d'indiçage ($F(1, 32) = 11.659, p = 0.002, \eta^2 = 0.267$). Une analyse des effets simples de la modalité avec la localisation de la cible comme facteur modérateur montre que lorsque la cible se trouve devant, il n'y a pas d'effet significatif de la modalité sur l'effet d'indiçage ($p = 0.673$). Les participants obtiennent un effet d'indiçage similaire pour les indices visuels et auditifs (513ms et 479ms respectivement). Par contre, lorsque la cible se trouve à l'arrière, il y a un effet significatif de la modalité sur l'effet d'indiçage ($p = < 0.001$). Les participants obtiennent un effet d'indiçage plus important pour l'indice visuel (731ms) que pour l'indice auditif (270ms).

3.2.2.3 Conclusion

Comme attendu, nous avons observé un effet principal de la validité de l'indice comme dans les études classiques de Posner. Les participants avaient des TR plus courts lorsque l'indice indiquait un emplacement correct de la cible plutôt qu'incorrect. Cependant, bien que cet effet soit présent indépendamment des autres conditions, sa magnitude (cueing effect) varie en fonction de l'emplacement de la cible et de la modalité de l'indice, comme le révèle la triple interaction entre la validité de l'indice, la localisation de la cible et la modalité de l'indice. Pour comprendre cette interaction, nous avons effectué une nouvelle analyse portant cette fois sur l'effet d'indication obtenu en soustrayant les RT entre les conditions valides et invalides pour chaque autre variation expérimentale.

Cette nouvelle analyse révèle une interaction significative entre l'emplacement de la cible et la modalité de l'indice sur l'effet d'indication, qui révèle que les TR des participants ne diffèrent pas en fonction de la modalité de l'indice lorsque la cible apparaît devant eux. En revanche, lorsque la cible apparaît derrière eux, l'effet d'indication est significativement plus important pour l'indice visuel que pour l'indice auditif. Il semblerait donc que les deux types d'indices agissent de manière similaire lorsqu'ils orientent l'attention devant la personne. En revanche, lorsque l'attention de la personne est dirigée vers l'arrière, alors les indices auditifs diffèrent significativement des indices visuels, ce qui se traduit par un effet d'indication plus faible. Il faut cependant noter que l'absence d'une condition neutre (avec repère non informatif) ne nous permet pas de savoir comment la balance coût/bénéfice affecte cette différence.

En effet, ces différences peuvent être dues à un coût plus élevé de désengagement de l'avant vers l'arrière pour les indices visuels et/ou à un coût plus faible de désengagement pour les indices auditifs, ainsi qu'à un éventuel plus grand bénéfice de l'indice visuel par rapport à l'indice auditif dans l'espace arrière. Cependant, la similarité relative des temps de

réponse pour les essais valides dans l'espace arrière, quelle que soit la modalité, nous amène à défendre un coût plus élevé des indices visuels pour l'espace arrière. En effet, nous pouvons supposer que la présentation d'indices visuels devant les sujets capte automatiquement l'attention vers l'avant. Ainsi, ils entraînent un coût supplémentaire de désengagement lorsque l'attention doit être dirigée vers l'arrière par rapport aux indices auditifs qui ne proviennent pas d'un emplacement spatial spécifique. Enfin, notons que la taille relativement importante des effets de validité observés (>150ms) nous amène à penser que des artefacts ont probablement été induits par les mouvements de la tête du sujet.

Dans la prochaine expérience, une nouvelle version de la tâche de Posner, qui limite les effets des mouvements de la tête, a été développée pour réduire au maximum leur incidence. La méthode d'étude de l'orientation de l'attention 360° utilisée dans cette expérience ne semble donc pas optimale, même si elle soulève des questions théoriques qui pourraient être étudiées plus en détail tel que la balance coût/bénéfice en fonction de la modalité de l'indice et de l'emplacement de la cible.

3.2.3 Attention au débris

La précédente expérience a proposé une méthode d'analyse du déploiement de l'attention à 360° en utilisant des indices endogènes centraux et des cibles hors champs visuelles. Les cibles ont été placées de sorte que l'amplitude des mouvements de têtes nécessaire pour percevoir la cible soit équivalent pour toutes les cibles. Néanmoins, l'absence de contrôle rigoureux sur ces amplitudes de mouvement à impacter les résultats. Comme le révèlent la trop grande différence de temps de réponse entre les conditions valides et invalides (différence > 150ms). Dans la prochaine expérience, nous avons donc mis au point une autre méthode, basé sur l'utilisation d'information réflexive (miroir) afin d'orienter l'attention des sujets vers l'espace située derrière eux.

3.2.3.1 Méthode

Participants

Vingt-neuf participants (9 femmes, âge moyen : \pm SD: 28 ± 9 ans) se sont portés volontaires pour participer à cette étude. La procédure de recrutement était identique à celle de l'expérience 1.

Matériel Le même matériel que celui de l'expérience 1 a été utilisé.

Stimuli

L'environnement virtuel était similaire à celui de l'expérience 1, mais cette fois les participants se trouvaient à l'intérieur d'un "vaisseau spatial" ressemblant à un avion de combat. " Des outils d'assistance à la visée " ont été ajoutés à l'avant du vaisseau spatial pour contrôler l'apparition de la cible dans des zones spécifiques du champ visuel. Ces zones étaient de taille et de forme identiques. Cet "outil d'assistance à la visée" consistait en un affichage tête

haute (head-up display = HUD) d'une taille de $4^\circ \times 5^\circ$ et qui servait de point de fixation. Aux quatre coins du HUD, se trouvaient deux viseurs transparents alignés horizontalement de taille $6^\circ \times 13^\circ$ et deux rétroviseurs de taille $6.5^\circ \times 13.5^\circ$ alignés horizontalement. La position des rétroviseurs et des viseurs était contrebalancée entre les sujets. Ceci afin d'éviter que nos résultats reflètent une différence de capacité d'orientation dans le champ visuel supérieur par rapport au champ visuel inférieur et non pas nos variables d'orientation manipulées avant ou arrière. Les rétroviseurs pouvaient être placés en bas et les viseurs en haut ou inversement, selon les sujets.

Deux types d'indices étaient utilisés : des instructions vocales constituant des indices audio endogènes et des flèches directionnelles constituant des indices visuels endogènes. Les instructions vocales étaient : " Devant à gauche ", " Derrière à gauche ", " Devant à droite " et " Derrière à droite " ou " À gauche devant ", " À gauche derrière ", " À droite devant " et " À gauche devant ". L'ordre des mots était inversé en fonction des sujets. Les flèches étaient de taille $0.02^\circ \times 0.06^\circ$. Les instructions vocales avaient une durée de 500-600 ms et la flèche directionnelle était affichée pendant 300 ms. Les cibles étaient des "débris spatiaux" de taille variable et attribuée aléatoirement en fonction des sujets. Comme dans la première expérience, si l'on considère une position neutre de la tête (tout droit devant soi) comme point de départ, l'espace frontal couvre 90° à gauche et 90° à droite ; l'espace arrière s'étend de 90° à 180° à gauche et à droite. Les cibles frontales étaient présentées à 45° vers la gauche ou la droite et les cibles arrière à 135° vers la gauche ou la droite.

Pour les essais invalides, la cible ne pouvait pas apparaître à une position diagonale directement opposée. Pour l'indice auditif neutre, l'instruction était "débris proches". Pour l'indice visuel neutre, toutes les flèches étaient affichées simultanément avec une taille de $1.2^\circ \times 1.7^\circ$. Pour les essais valides, l'indice signale la position correcte de la cible. Pour les essais invalides, l'indice indique une mauvaise position, mais la cible ne peut pas apparaître

à une position diagonalement opposée, c'est-à-dire que si l'indice indique que la cible va apparaître devant à gauche, elle peut apparaître devant à droite ou derrière à gauche, mais jamais derrière à droite. Ceci afin de s'assurer que dans les essais invalides, la distance de la cible par rapport à la position annoncée reste la même. Enfin, les indices neutres ne fournissent aucune information spatiale.

Procédure

Similaire à l'expérience 1, mais toutes les actions étaient effectuées avec le regard seulement. Les mêmes instructions que dans l'expérience 1 étaient fournies, sauf pour l'interaction. Les participants étaient invités à verrouiller les cibles en regardant le viseur ou le rétroviseur correspondant à la position de la cible. Ils devaient se concentrer jusqu'à ce que la cible soit détruite pour les cibles frontales (viseur) ou se retourner et regarder la cible pour la détruire pour les cibles arrière (rétroviseur). Nous avons implémenté le retournement pour les cibles arrière afin de leur permettre de se construire une représentation mentale de l'espace derrière eux et de leur faire prendre conscience que les cibles affichées dans les rétroviseurs apparaissent réellement derrière eux.

Ensuite, les participants ont reçu pour instruction de détruire le plus rapidement possible la cible (débris spatial). Ils ont été informés qu'un indice indiquant l'emplacement le plus probable de la cible leur serait fourni et qu'ils devraient utiliser cet indice pour réagir aussi rapidement que possible. Ils ont également été informés que dans 80% des cas, l'indice fournirait l'emplacement exact de la cible. En plus des instructions générales (voir partie 3.2.2), il leur a été rappelé de garder les yeux sur le point de fixation (sur le HUD) jusqu'à ce que des débris soient visibles (la cible). Si les participants déplaçaient leurs yeux trop tôt, l'essai en cours était annulé et un nouvel essai était généré. Avant la phase expérimentale, 16 essais ont été présentés aux participants pour les entraîner (8 essais par type de repère).

Au début de chaque essai, les participants étaient invités à garder les yeux sur le point de fixation. Après un délai de 1,5 seconde, un indice était fourni en fonction des conditions expérimentales. Les indices visuels étaient affichés pendant 300 ms tandis que les indices auditifs avaient une durée de 600 ms en raison du temps nécessaire pour prononcer les mots. Après un ISI de 300 ms, la cible apparaissait à l'un des 4 emplacements possibles. Une fois la cible apparue, les participants devaient la détruire en suivant les instructions décrites ci-dessus : tout d'abord verrouiller la position de la cible en regardant dans le viseur ou le rétroviseur approprié, puis détruire la cible selon les règles d'interaction décrite ci-dessus. Après la destruction de la cible, un intervalle de temps variable de 1 à 2s était respecté. La phase expérimentale comprenait 120 essais : 60 essais par type d'indice (visuel/auditif), répartis en 20 essais neutres, 30 essais valides (15 devant et 15 derrière) et 10 essais invalides (5 avec occurrence de la cible à l'avant et 5 à l'arrière). La durée totale de l'expérience était de 35 à 45 minutes, dont un minimum de 25 minutes de sessions expérimentales.

Variable dépendante

Nous avons enregistré deux temps de réponse oculaires différents, tous deux démarrant à partir de l'apparition de la cible :

1. *Initiation–Regard* correspond au moment où le participant initie le mouvement des yeux et quitte le point de fixation
2. *Verrouillage–Cible* lorsque le participant fixe le viseur / rétroviseur correspondant à la position de la cible (réponse oculaire).

Filtre de donnée

Les TR supérieurs à 1,5 s et inférieurs à 0,05 s ont été exclus de l'analyse pour *Initiation–Regard*. Les TR supérieurs à 2 secondes et inférieurs à 0,150s ont été exclus de l'analyse du

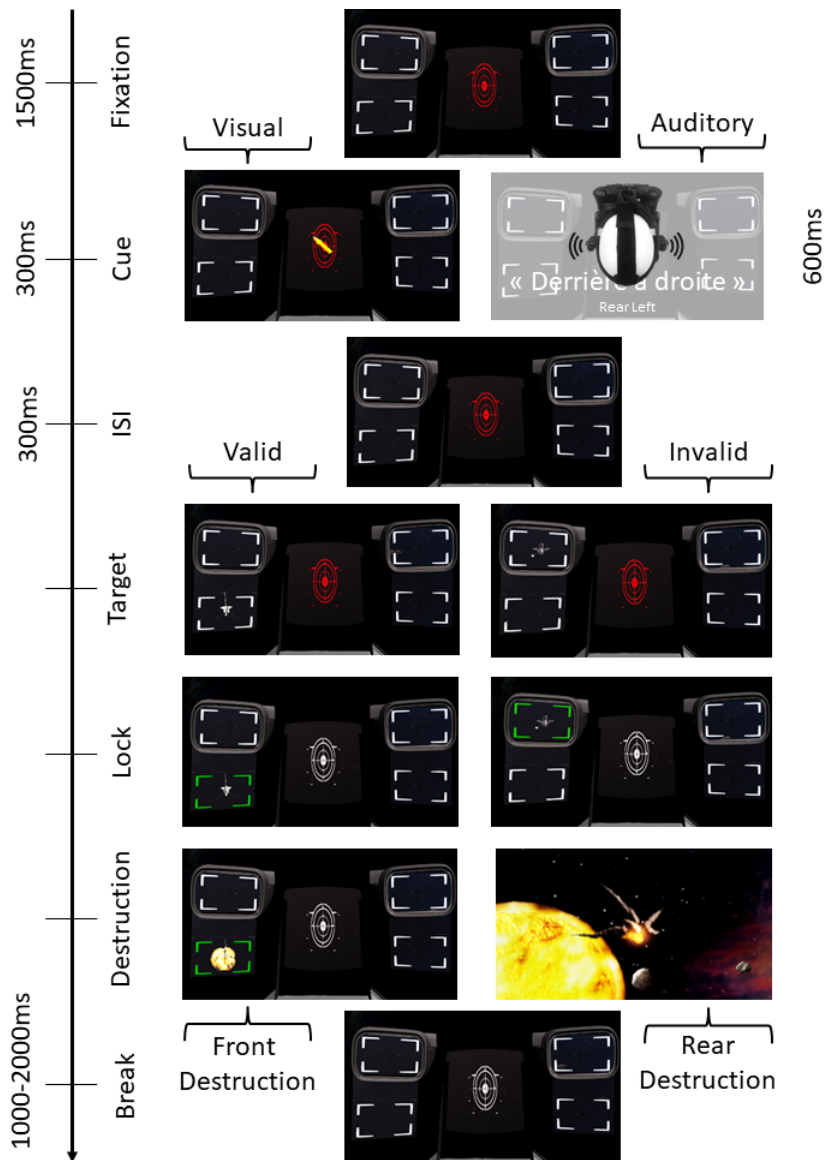


Figure 3.4. Déroulement d'un essai (de haut en bas) dans l'expérience 5

Verrouillage de la cible. Le même filtre de TR que dans l'expérience 1 a été appliqué (1% exclu). Les TR moyens de 2 participants pour *Verrouillage-Cible* ($M=1.975s$ et $M=1.413s$) étaient au-dessus de la limite supérieure ($Q3 + \text{intervalle interquartile} \times 1.5$) par rapport

à l'échantillon. Les données obtenues sur ces participants ont été considérées comme aberrantes et retirées de l'analyse (voir Tukey, 1977). L'analyse porte sur $118,8 \pm 2,7$ essais par participant pour les TR de *Initiation-Regard* et $116,6 \pm 7,8$ essais par participant pour les TR de Verouillage de la cible. Nous avons effectué une analyse statistique pour comprendre l'effet des indices sur les TR des sujets selon la localisation spatiale (avant/arrière), la validité (valide/invalid/neutre) et la modalité (visuelle/auditive).

3.2.3.2 Résultats

Nous avons utilisé le logiciel JASP pour effectuer une analyse de variance (ANOVA) à trois voies à mesures répétées sur les TR moyens pour chaque variable dépendante afin d'observer l'effet de nos facteurs manipulés : Validité (valide/neutre/invalid), modalité (visuelle/auditive) et emplacement (avant/arrière). Le test LSD de Fisher a été utilisé pour les comparaisons post-hoc.

Pour *Initiation-Regard*, comme pour la première expérience, l'analyse a révélé un effet principal significatif de la validité, $F(2, 56) = 26.0, p < .001, \eta^2 = 0.48$. Un test post-hoc a montré que l'initiation du regard des sujets était significativement plus courte lorsque l'indice était valide plutôt que neutre ($p < .001, MD = 69ms$) ou invalide ($p = .001, MD = 52ms$). De manière surprenante, aucune différence significative ne ressort entre les conditions invalides et neutres ($p = .318$). En outre, un effet principal significatif de la modalité est observé, avec des temps de réponse plus courts pour les indices auditifs que pour les indices visuels, $F(1, 28) = 9.25, p = .005, \eta^2 = 0.25$. Enfin, l'analyse a révélé un effet principal significatif de l'emplacement de l'indice, $F(1, 28) = 5.63, p = .025, \eta^2 = 0.17$. Les participants obtiennent des RT significativement plus courts lorsque la cible apparaît devant plutôt que derrière eux ($MD = 29ms$).

Cependant, nous observons une interaction significative entre la validité de l'indice et la

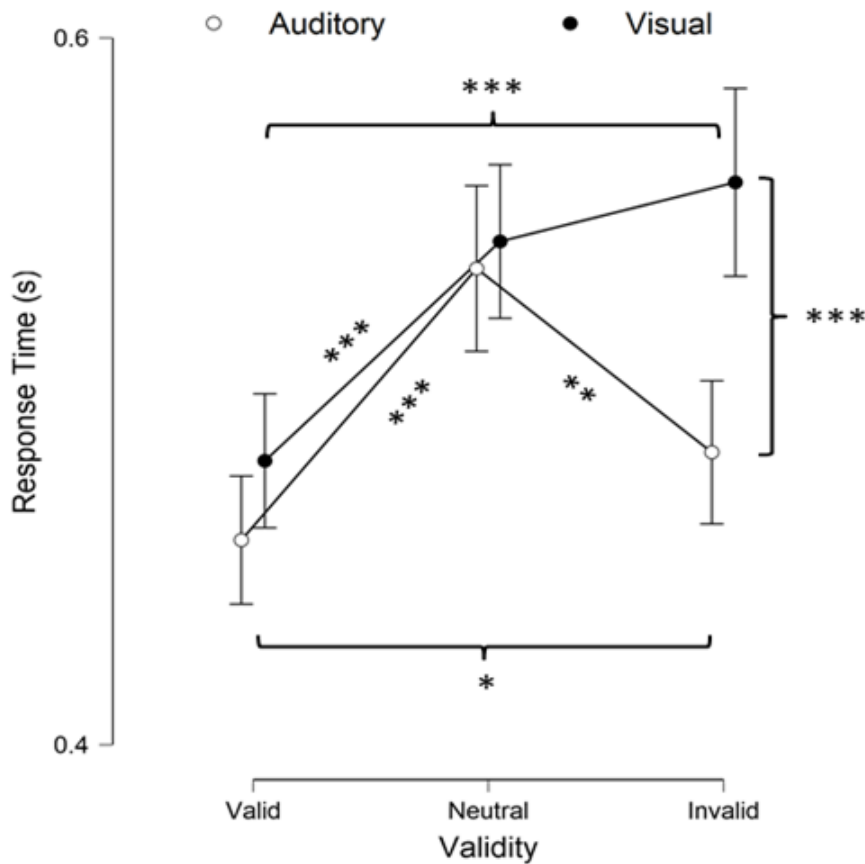


Figure 3.5. Moyenne de temps de réponse pour *Initiation-Regard* en fonction de la validité et de la modalité de l'indice. * = $p < .05$, ** = $p < .01$, *** = $p < .001$

modalité de l'indice, $F(2, 56) = 10.6, p < .001, \eta^2 = 0.28$. Une analyse simple de l'effet de la modalité en fonction de la validité révèle une différence significative entre les indices auditifs et visuels pour les essais invalides seulement ($p < .001, MD = 169ms$). De plus, une analyse post hoc de la validité selon la modalité montre que lorsque la modalité de l'indice est visuelle, l'initiation du regard est plus courte lorsque l'indice est valide que lorsque l'indice est neutre ($p < .001, MD=62ms$) ou invalide ($p < .001, MD=79ms$), mais il n'y a pas de

différence entre les essais neutres et invalides ($p = .652$). En revanche, lorsque l'indice était auditif, l'initiation du regard demeure plus courte pour les indices valides que pour les indices neutres ($p < .001$, MD=77ms) ou invalides ($p = .048$, MD=25ms), mais il existe une différence inattendue entre les essais neutres et invalides, avec des temps de réponse plus courts pour les indices invalides que pour les indices neutres ($p = .003$, MD=52ms), voir Figure 3.5.

Pour *Verrouillage-Cible*, l'analyse a révélé un schéma de résultats similaire. L'effet principal de la validité est significatif, $F(2, 52) = 38.8, p < .001, \eta^2 = 0.60$, avec une réponse oculaire significativement plus courte pour la condition valide en comparaison à la condition neutre ($p < .001$, MD=80ms) et invalide ($p < .001$, MD=73ms). Aucune différence significative entre les conditions invalides et neutres n'est observée. L'effet de la modalité demeure significatif, $F(1, 26) = 6.1, p = .021, \eta^2 = 0.19$, mais l'effet de localisation n'est plus significatif $F(1, 26) = 0.86, p = .364, \eta^2 = 0.03$. Cependant, l'analyse indique une interaction significative entre la validité de l'indice et la localisation. Une analyse des effets simples de la validité en fonction de la localisation montre que les TR sont plus courts dans l'espace arrière que dans l'espace avant uniquement pour les indices valides ($p = .05$, MD=17ms). Aucune différence ne se manifeste pour les indices neutres ($p = .38$) ni pour les indices invalides ($p = .218$), voir Fig. reff6.

Enfin, l'interaction entre la modalité et la validité est significative, $F(2, 52) = 7.2, p = .002, \eta^2 = 0.22$. L'analyse des effets simples de la modalité en fonction de la validité a indiqué une différence significative entre les indices auditifs et visuels uniquement pour les essais invalides ($p < .001$, MD=168ms). De plus, le test post-hoc de validité selon la modalité a indiqué que pour la modalité visuelle, il y avait une différence statistique entre toutes les conditions de validité avec des TR plus court pour les indices valides que les indices neutres ($p < .001$, MD=68ms), pour les indices valides que les invalides ($p < .001$, MD=98ms) et

pour les indices neutres que les invalides ($p = .026$, MD=30ms). Pour la modalité auditive, les réponses oculaires des participants étaient plus courtes pour les indices valides que pour les indices neutres ($p < .001$, MD=92ms) et pour les indices valides que pour les indices invalides ($p = .018$, MD=47ms). Nous constatons également que les TR pour les indices invalides ont tendance à être plus courts que pour les indices neutres ($p = .054$, MD=45ms), voir Figure 3.7.

3.2.3.3 Conclusion

Comme attendu, nous observons un effet principal de la validité de l'indice comme dans l'expérience 1. Cependant, il n'y a pas de différence significative entre les essais neutres et invalides. Cette observation se révèle aussi bien dans le cas de *Initiation-Regard* que dans celui de *Verrouillage-Cible*. Une interaction significative, pour chaque mesure, entre la modalité et la validité de l'indice permet de mieux comprendre ces résultats imprévus. Pour la latence saccadique (initiation du regard) l'on observe des TR plus courts lorsque l'indice est visuel et fournit des informations correctes sur l'endroit où la cible apparaîtra (valide) que des informations incorrectes (invalide) ou lorsqu'il n'y a pas d'indice informatif (neutre). De plus, aucune différence n'est observée entre ces deux dernières conditions (neutre vs. invalide). En revanche, pour l'indice auditif, les participants répondent plus rapidement lorsque l'indice fournit une indication correcte sur l'emplacement de la cible (valide) que lorsqu'il ne le fait pas (neutre) ou qu'il indique une mauvaise position (invalide). Enfin, les TR des participants sont plus courts lorsque l'indice auditif indique une position incorrecte (invalide) que lorsqu'il ne fournit aucune information de localisation (neutre). Pour la réponse oculaire (verrouillage de la cible), dans le cas des indices visuels, on observe des TR plus courts lorsque l'indice fournit une information correcte (valide) sur l'endroit d'apparition de la cible que lorsque cet indice est faux (invalide) ou non informatif (neutre). Néanmoins,

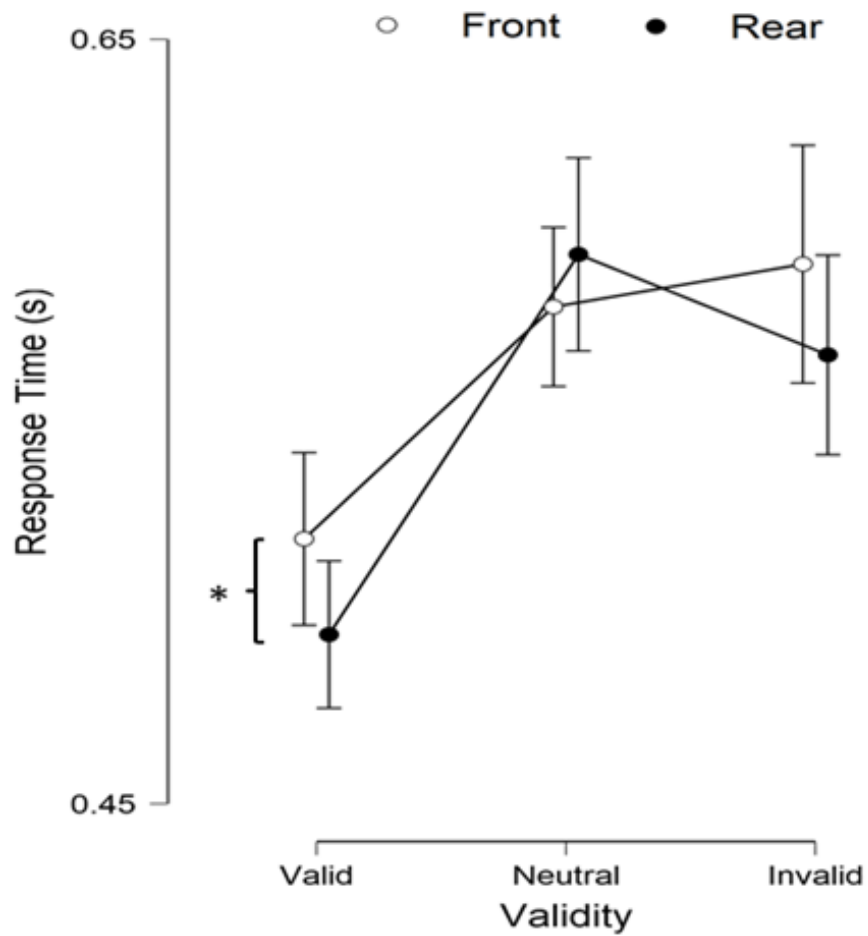


Figure 3.6. Moyenne des temps de réponses pour Verrouillage–Cible en fonction de la validité de l’indice et de la localisation de la cible.

* = $p < .05$, ** = $p < .01$, *** = $p < .001$

lorsque l’indice fournit une indication erronée sur la localisation de la cible (invalide), les TR des sujets sont plus lents que lorsque l’indice ne fournit aucune indication (neutre). Pour les indices auditifs, les participants répondent plus rapidement lorsque l’indice fournit une

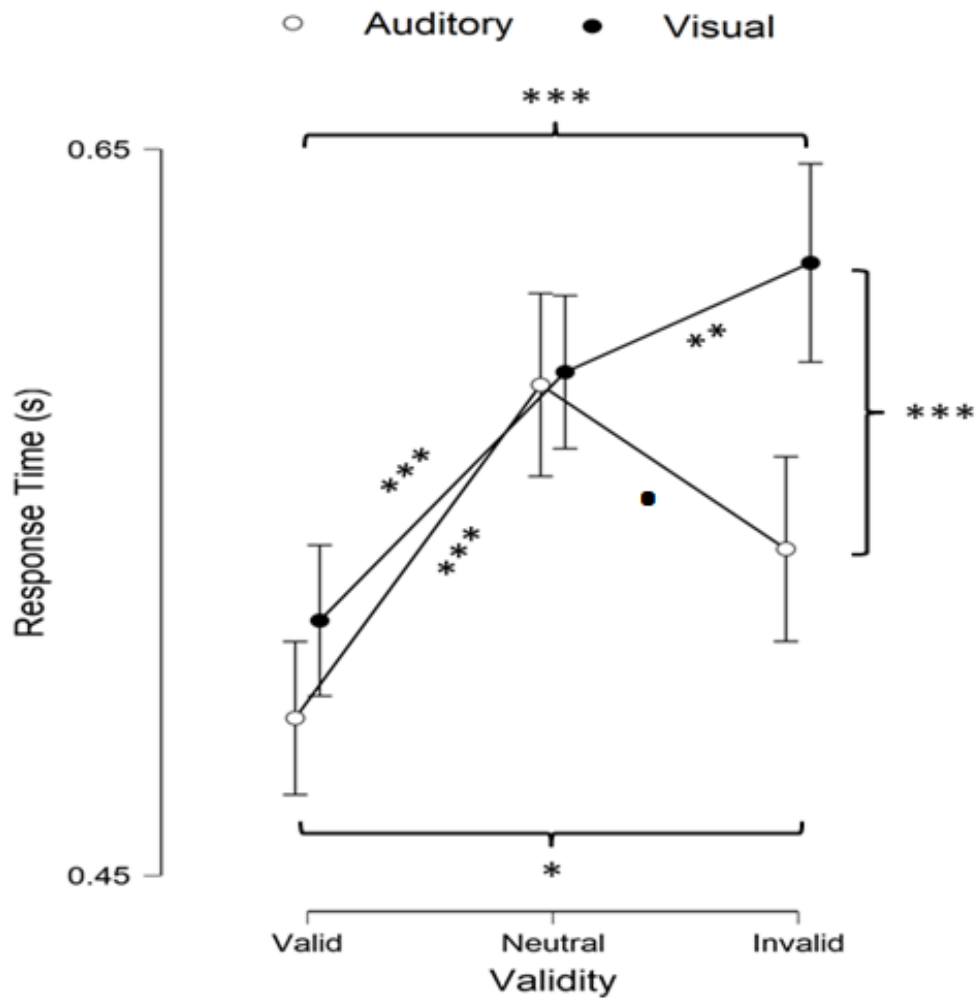


Figure 3.7. Mean RTs for *Verrouillage-Cible* according to validity and modality.

· = $p < .10$, * = $p < .05$, ** = $p < .01$, *** = $p < .001$

indication correcte sur la localisation de la cible (valide) que lorsqu'il ne le fait pas (neutre) ou fournir une indication erronée (invalide). Contrairement à ce qui est observé pour la latence saccadique, les TR des participants ne sont pas significativement différents lorsque l'indice auditif indique une position incorrecte (invalide) ou ne fournit aucune information

sur la position de la cible (neutre). On observe donc, une latence saccadique plus faible et une réponse oculaire plus rapide lorsque les participants sont correctement orientés que lorsqu'ils ne sont pas orientés (valide vs neutre) ou mal orientés (valide vs invalide) pour les indices visuels et auditifs. Ces résultats montrent que les deux types d'indices sont donc capables de diriger l'attention et produisent des bénéfices de traitement de l'information visuelle même lorsque la cible à traiter est perçue à travers un miroir et que l'attention est orientée vers un objet situé derrière la personne.

Néanmoins, nous observons des différences dans les coûts de traitement selon la modalité des indices et la mesure utilisée. En effet, pour les indices visuels, il n'y a pas de différence au niveau de la latence saccadique lorsque la personne n'est pas orientée ou est mal orientée, suggérant que l'indice visuel ne produit pas de coût supplémentaire sur l'initiation du mouvement oculaire. En revanche, ce coût est présent pour la réponse oculaire où l'on observe des TR oculaires plus longs lorsque la personne est mal orientée que lorsqu'elle n'est pas orientée. L'absence de coût de traitement au niveau de la mesure de la latence saccadique pourrait être due à une initiation automatique d'une saccade oculaire vers l'endroit où les participants s'attendent à voir la cible après son apparition, mais qui est ensuite corrigée vers l'endroit effectif d'apparition de la cible. Par conséquent, aucune différence dans la latence de la saccade initiale n'est observée entre la condition sans orientation préalable et avec orientation erronée. Mais, cette différence réapparaît dans les mesures de réponse oculaire, car le parcours visuel dans le cas d'une orientation erronée peut être plus long en comparaison à une orientation effective.

Pour l'indice auditif, les coûts de traitement semblent être absents et des bénéfices sont observés même lorsque la personne est mal orientée. En effet, dans la mesure de la latence saccadique, on observe une initiation du regard plus rapide lorsque les participants sont mal orientés que lorsqu'ils ne le sont pas. En revanche, pour la réponse oculaire, il n'y a pas

plus de différence. Ici, l'hypothèse d'une saccade automatique dans la direction de l'endroit indiqué par l'indice est plus difficile à défendre. En effet, celui-ci étant auditif, il est moins probable qu'une capture automatiquement du regard des participants vers l'emplacement de la cible soit induit par ce type d'indice. De plus, s'il n'y a pas de coût de traitement pour les indices visuels, on constate ici un réel bénéfice en termes de latence saccadique lorsque l'indice est erroné. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces résultats. La première hypothèse est un problème de conception comme suggéré par Chica et al, 2014 lorsque la performance observée pour les essais neutres ne se situe pas entre les essais valides et invalides. Par exemple, la fréquence des essais neutres, la facilité d'encodage ou le potentiel d'alerte sont autant de facteurs qui peuvent expliquer ces résultats. Cependant, dans notre expérience, le plan expérimental est le même pour l'indice visuel et auditif et dans le cas de l'indice visuel, le schéma de résultats est classique à ceux habituellement obtenus dans la littérature (la seule différence est la durée de l'indice et l'aspect sémantique de l'instruction vocale). De plus, les temps de réponse pour l'indice neutre visuel et l'indice neutre auditif sont étonnamment similaires, ce qui suggère que les processus qui sous-tendent le traitement de l'indice neutre sont les mêmes pour les deux modalités. Un problème de conception, bien que probable, ne semble pas être l'hypothèse à privilégier.

La seconde hypothèse, plus plausible, consiste à chercher l'origine des différences de coût observées entre l'indice visuel et l'indice auditif dans le lien intermodal entre l'indice et la cible. En effet, dans notre expérience, la cible est toujours visuelle. Ainsi, lorsque l'indice est visuel, l'orientation attentionnelle générée est intramodale (du visuel au visuel) alors que lorsque l'indice est auditif, l'orientation attentionnelle est intermodale (de l'auditif au visuel). Les liens qu'il existe entre l'attention crossmodale et intramodale sont complexes et nombreux (Eimer & Schröger, 1998; Teder-Sälejärvi, Münte, Sperlich, & Hillyard, 1999). L'on sait par exemple qu'un lien spatial direct entre l'indice et la cible dans le cas

d'une orientation crossmodale audiovisuelle n'est pas systématiquement nécessaire (Driver & Spence, 1998). En effet, une facilitation du traitement peut être observée si l'indice auditif n'indique pas précisément la bonne position d'une cible visuelle à traiter, même si cette facilitation reste plus faible que lorsque les deux positions correspondent. Ainsi, il est possible que l'indice auditif invalide permette aux participants de sélectionner plus rapidement les informations visuelles. Cependant, en suivant cette hypothèse, l'on peut se demander pourquoi les indices auditifs neutres ne produisent pas un effet similaire. La simple activation des processus spatiaux, aussi erronés soient-ils, permet-elle un traitement prioritaire des informations visuelles dans une tâche donnée ou conditionne-t-elle sa réussite ? En effet, la seule différence entre un indice auditif neutre et un indice auditif invalide est que l'indice neutre ne fournit aucune information spatiale, alors que l'indice invalide en fournit une. Il est alors possible que lorsqu'un indice permet d'activer des processus spatiaux, il puisse améliorer les performances de traitement de l'information visuelle qui doit être traitée ultérieurement, même si l'information spatiale fournie est fautive, par rapport à un indice qui ne permet pas cette activation. Cette facilitation semble ne concerner que les premières étapes du traitement (latence saccadique), et non la performance globale (réponse oculaire). Malheureusement, l'absence d'essais neutres dans la grande majorité des études, que ce soit en orientation intramodale et encore plus en orientation cross-modale, ne permet pas de comprendre pleinement nos résultats. Des études complémentaires sont donc nécessaires.

En résumé, il semblerait que tous les indices utilisés dans cette expérience puissent être utilisés pour améliorer le traitement de l'information, quelle que soit leur position dans l'espace (frontale, dorsale). Mais, leurs coûts semblent varier en fonction de la modalité utilisée et des mesures effectuées. Pour les indices visuels, aucun coût significatif n'a été observé pour l'initiation du regard. En revanche, pour le verrouillage de la cible, nos résultats rejoignent ceux de la littérature ($TR_{valide} < TR_{neutre} < TR_{invalide}$). En effet,

nous observons des temps de réponse plus courts lorsque l'indice oriente l'attention au bon endroit que lorsqu'il ne permet pas aux participants d'orienter leur attention. De plus, les indices qui ne permettent pas d'orienter l'attention (neutre) entraînent un traitement plus rapide de l'information cible que les indices qui orientent l'attention au mauvais endroit. Pour les indices auditifs, les résultats suggèrent un avantage lorsque l'indice dirige l'attention au mauvais endroit (invalide) que lorsqu'il ne permet pas de diriger l'attention (neutre). Cet avantage semble être significatif pour l'initiation du regard et marginal pour le verrouillage de la cible. Ce résultat est inattendu, mais l'on constate cependant dans la littérature un comportement souvent non prédictif des indices neutres (Chica et al., 2014). Malheureusement, malgré l'intégration d'essais neutres, notre design expérimental ne nous permet pas d'étudier en profondeur ces résultats. Des études supplémentaires sont nécessaires pour répliquer et comprendre cet effet.

Enfin, l'effet principal de localisation de l'indice est significatif pour l'initiation du regard et montre des TR plus courts pour les cibles apparaissant à l'avant plutôt qu'à l'arrière. Ce résultat suggère que les participants traitent plus efficacement les informations lorsqu'elles apparaissent devant (viseur) plutôt que derrière (rétroviseur), même si toutes les informations à traiter sont fournies devant. Comme dans l'expérience de Ho et Spence (Ho & Spence, 2005) et les hypothèses suggérées par Spence et al. (Spence et al., 2017) sur l'orientation cross-modale (audiovisuel), il semblerait que les informations qui existent en dehors du champ visuel, mais qui sont vues par réflexion nécessitent des processus cognitifs différents de ceux impliqués dans le traitement des informations qui sont uniquement présentes devant nous. Notons que cet effet n'est plus significatif pour le verrouillage de la cible. Mais une interaction significative entre la validité de l'indice et l'emplacement montre que les TR sont plus courts lorsque la cible apparaît à l'arrière plutôt qu'à l'avant lorsque l'indice fournit des informations correctes sur l'emplacement de la cible, ce qui pourrait expliquer l'absence

d'effet principal de localisation pour cette mesure.

3.2.4 Discussion Générale

La tâche de Posner est un paradigme expérimental classique en sciences cognitives pour mesurer l'orientation de l'attention. Récemment, il a été suggéré que ce paradigme peut être adapté en réalité virtuelle (c'est-à-dire dans un environnement immersif et écologique) pour évaluer l'efficacité des stimuli perceptifs dans l'orientation de l'attention Soret et al., 2019. L'objectif de cette étude était de comprendre si ces mécanismes pouvaient améliorer le traitement de l'information visuelle quand celle-ci apparaît en dehors du champ visuel direct et plus particulièrement dans l'espace arrière. Pour ce faire, nous avons évalué les performances de traitement de l'information visuelle (temps de réaction et réponse oculométrique) dans deux tâches spatiales lorsque des indices endogènes sont fournis aux participants pour déclencher une orientation attentionnelle volontaire dans une région spécifique de l'espace visuel (FOR de 360°). Les deux expériences ont permis de répliquer les résultats classiques de la littérature sur la tâche de Posner, ce qui montre qu'elle peut être adaptée pour l'investigation des effets de l'orientation attentionnelle à 360°.

Par ailleurs, notre étude suggère qu'une modification de ce paradigme pourrait permettre d'étudier les mécanismes d'orientation impliqués dans le traitement de l'espace arrière. En particulier par l'utilisation de dispositifs réfléchissants, comme un miroir, pour simuler l'espace arrière qui ne semble pas impliquer les mêmes mécanismes que ceux impliqués dans le traitement de l'espace frontal. En effet, dans l'expérience 2, même si toute l'information à traiter (les cibles) était fournie devant les participants, comme dans une tâche classique de Posner, elle pouvait être perçue à travers une vitre (viseur) ou par réflexion (rétroviseur). Cette différence n'est pas perceptive (l'information étant perceptivement identique dans les deux cas) mais cognitive, c'est-à-dire que les sujets étaient conscients que l'information vue

dans le miroir existait dans l'environnement immersif derrière eux alors que l'information vue à travers la fenêtre n'existait que devant eux. Ces deux conditions ont entraîné des temps de réponse statistiquement différents. Ce résultat suggère que la localisation spatiale réelle de l'information à traiter (à l'intérieur ou à l'extérieur du champ visuel du sujet) a une influence sur le traitement effectué, même si cette information est perçue dans le champ visuel frontal.

3.3 Information réflexive dans un paradigme de Posner

Les deux expériences précédentes se sont proposé d'estimer l'efficacité de deux méthodes pour étudier l'orientation de l'attention visuelle à 360° en réalité virtuelle. Pour ce faire, nous avons utilisé deux versions modifiées du paradigme de Posner. Une version où toutes les cibles apparaissaient en dehors du champ visuel direct des sujets et une version avec utilisation de rétroviseur pour refléter l'espace arrière. Les résultats de ces deux expériences nous amènent à privilégier la version avec utilisation de rétroviseur, car elle à l'avantage d'un contrôle plus rigoureux des facteurs expérimentaux et variables parasite. Dans la prochaine expérience, nous avons souhaité répliquer cette expérience afin de combler certaines limites et consolider nos conclusions.

3.3.1 Introduction

Le paradigme de Posner (Posner, 1980) est un paradigme expérimental devenu classique en sciences cognitives pour mesurer nos capacités à orienter notre attention visuelle dans l'espace. La plupart des études qui ont utilisé ce paradigme ont été menées en laboratoire devant un écran d'ordinateur. Mais récemment, il a été suggéré que ce paradigme peut être adapté en réalité virtuelle (c'est-à-dire dans un environnement immersif et écologique) pour évaluer l'efficacité de différents stimuli perceptifs pour orienter l'attention (Soret et al., 2019) et par extension les mécanismes qui sous-tendent cette orientation. L'objectif de cette étude était de comprendre si ces mécanismes pouvaient améliorer le traitement de l'information visuelle lorsqu'une information à traiter peut apparaître en dehors du champ visuel direct et notamment dans l'espace arrière. Pour ce faire, nous avons évalué les performances de traitement de l'information visuelle (temps de réaction et réponse oculométrique) dans deux tâches de destruction d'objets virtuelle lorsque des indices endogènes sont fournis

aux participants pour déclencher une orientation attentionnelle volontaire sur une région spécifique de l'espace visuel (FOR de 360°). Nos deux expériences ont répliqué les résultats classiques de la littérature sur le paradigme de Posner, ce qui montre qu'il peut être adapté pour l'investigation des effets d'une orientation attentionnelle à 360°. De plus, notre étude suggère qu'une modification de ce paradigme pourrait nous permettre d'étudier les mécanismes d'orientation impliqués dans le traitement de l'espace arrière. En particulier par l'utilisation de dispositifs réfléchissants, comme un miroir, pour simuler l'espace arrière qui ne semble pas impliquer les mêmes mécanismes que ceux impliqués dans le traitement de l'espace frontal. Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour atteindre cet objectif mais cette étude exploratoire pose les bases d'une nouvelle méthode d'étude du traitement de l'information spatiale en dehors du champ visuel.

Cette expérience est une réplique de l'expérience en réalité virtuelle "Attention au débris" (3.2.3) avec quelques modifications. Tout d'abord, nous avons voulu augmenter la difficulté de la tâche afin de mesurer la précision des réponses et étudier si les différences observées dans l'étude précédente avec une tâche de détection se retrouve également dans une tâche de discrimination. En effet, nous savons que la tâche à réaliser peut avoir un impact sur les résultats obtenus avec le paradigme de Posner (Chica et al., 2014). De plus, il a été montré qu'orienter volontairement l'attention permettait d'améliorer la précision de jugement perceptif (p. ex., Bashinski & Bacharach, 1980; Cheal & Gregory, 1997; Müller & Rabbitt, 1989). Cet effet persiste-t-il en réalité virtuelle comme cela a été observée pour une tâche de détection ? Existe-t-il une différence en fonction de la localisation réelle de la cible dans l'espace frontale ou arrière ? Deuxièmement, nous avons choisi de manipuler la prédictivité des indices (pourcentage d'essais valides et invalides dans un bloc expérimental) plutôt que d'utiliser des indices valides, invalides ou neutres afin d'éviter le comportement incertain des indices neutres tels qu'observés dans Soret et al. (2020) et fréquemment dans

la littérature (Chica et al., 2014; Gibson & Egeth, 1994; Riggio, Bello, & Umiltà, 1998). Le pouvoir prédictif de l'indice pouvait être de 100% (toujours valide) ou de 50% (c'est-à-dire invalides la moitié du temps). Nous nous attendons à un effet principal de la prédictivité de l'indice. Les temps de réponse des sujets devraient être plus rapides lorsque l'indice est fiable (prédictif à 100%) que lorsqu'il ne l'est pas (prédictif à 50%). De plus, nous nous attendons à un effet principal de l'emplacement de la cible (avant/arrière) comme dans l'expérience précédente (Soret et al). Les temps de réponse lorsque la cible se trouve à l'avant devraient être plus courts que les temps de réponse lorsque la cible se trouve à l'arrière.

3.3.2 Méthode

Participants

21 (8 femmes, âge moyen : 30 ± 8 SD) se sont portés volontaires pour participer à l'étude. Tous avaient une vision normale ou corrigée vers la normale, ne présentaient aucun problème d'audition et parlaient français (les indices auditifs étaient présentés en français). Conformément à la Déclaration d'Helsinki, tous les participants ont donné leur consentement écrit avant l'expérience. Ils n'ont reçu aucune contribution pour leur participation.

Matériel

Le matériel est identique à celui de l'étude de Soret et al, 2020, mais est rappelé ci-dessous (Soret et al., 2020). Un casque de réalité virtuelle HTC Vive avec un système d'eye-tracking Tobii intégré a été utilisé. Le casque dispose d'un écran Dual AMOLED de 3,6 pouces de diagonale, d'une résolution de 1080×1200 pixels par œil (2160×1200 combinés), d'un taux de rafraîchissement de 90 Hz et d'un champ de vision de 110° (145° en diagonale). Des contrôleurs HTC Vive ont été utilisés pour l'interaction. Le système de suivi des yeux a une fréquence de sortie des données du regard (binoculaire) de 120 Hz avec une précision estimée

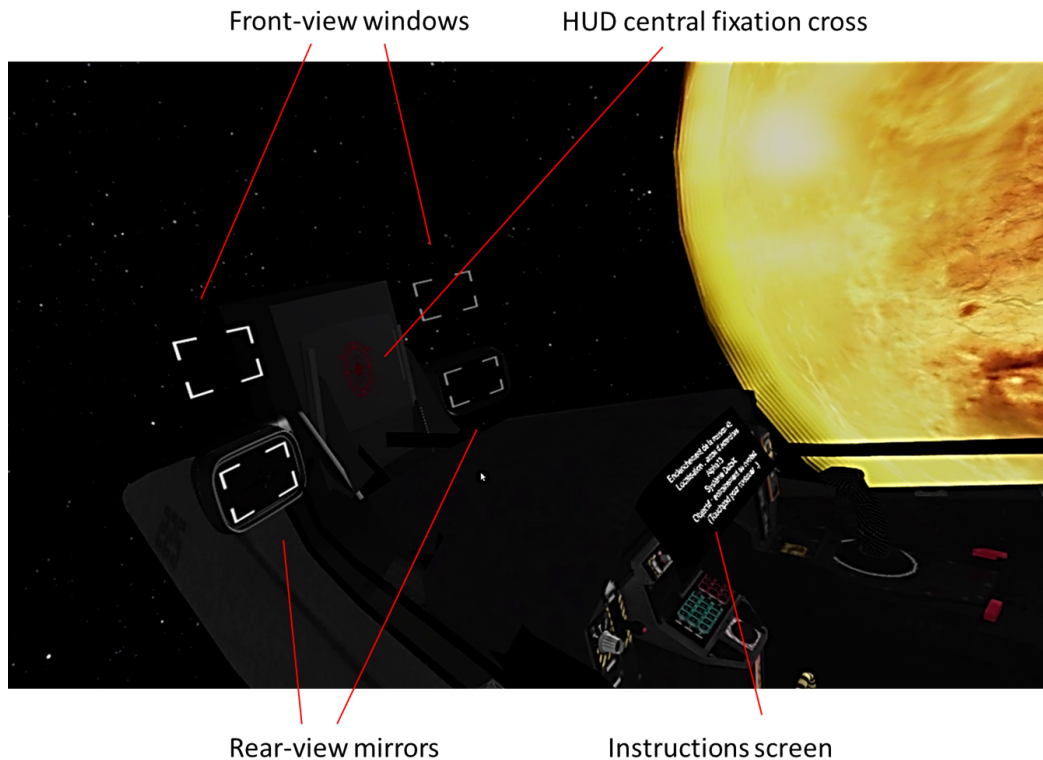


Figure 3.8. Instantané de l'environnement virtuel.

à 0,5°. L'oculomètre a un champ de vision traçable de 110° (champ de vision complet du HTC Vive). La tâche de Posner a été développée à l'aide du moteur de jeu Unity3D supportant la programmation C#. Nous avons également utilisé OpenVR, SteamVR, les plugins de suivi oculaire de Tobii et le SDK Tobii Pro.

Stimuli

La plupart des stimuli étaient identiques à ceux de l'étude précédente. Seules les modifications apportées seront donc précisées ci-dessous dans un souci de clarté. Les cibles étaient des vaisseaux spatiaux qui pouvaient être rouges ou bleus, et non plus des navettes spatiales. Les

indices ont les mêmes caractéristiques que l'expérience précédente. Il n'y a plus d'essai neutre. À la place, c'est le ratio essai valide/invalides qui a été manipulé (prédictivité de l'indice). Pour les blocs avec une prédictivité de 100 %, l'indice indiquait toujours la position droite de la cible. Pour les blocs avec une prédictivité de 50%, l'indice était valide (indiquait la bonne position de la cible) pour la moitié des essais et invalide (indiquait une mauvaise position) pour l'autre moitié. L'ordre des essais valides et invalides était aléatoire au sein du bloc. Pour les essais invalides, la cible ne pouvait pas apparaître à une position diagonale directement opposée. La tâche de discrimination consistait à identifier la couleur du vaisseau spatial et à choisir les munitions appropriées. Les vaisseaux spatiaux à téléporter étaient bleus et ceux à détruire étaient rouges. Les vaisseaux spatiaux perdaient leur couleur 250ms après leur apparition. Les participants devaient appuyer sur la touche "grip" de la manette droite pour sélectionner la munition de destruction, et sur la touche "grip" de la manette gauche pour sélectionner la munition de téléportation. Les touches de réponse étaient contrebalancées en fonction des sujets.

Procédure

Après avoir rempli un formulaire de consentement, les participants ont rempli un questionnaire préliminaire et lu la fiche d'information. Les instructions principales étaient de détruire ou de téléporter la cible le plus rapidement et le plus précisément possible en utilisant les indices fournis. Avant chaque bloc, les participants étaient informés de la prédictivité de l'indice (100% ou 50%) et des touches de réponse attribuées. Après avoir fixé pendant 1,5s le viseur central (point de fixation), les participants devaient choisir la munition (destruction/téléportation) en regardant le viseur ou le rétroviseur correspondant à l'emplacement de la cible et appuyer sur la touche de réponse correspondant à la couleur du vaisseau spatial. Les participants devaient fixer leur attention et appuyer sur le bouton du contrôleur pour

détruire ou téléporter le vaisseau spatial pour les cibles frontales (viseur) ou se retourner, regarder la cible et appuyer sur le bouton du contrôleur pour détruire les cibles arrière (rétroviseur). Nous avons implémenté le fait de se retourner pour les cibles arrière afin de permettre aux participants de construire une représentation mentale de l'espace derrière eux et d'associer plus facilement le rétroviseur à l'espace arrière. Après un ISI de 300 ms, la cible apparaissait dans l'un des 4 emplacements possibles. Si le regard des participants quittait le point de fixation avant l'apparition de la cible, un nouvel essai était lancé. Une fois la cible apparue, les participants devaient la détruire en suivant les instructions décrites ci-dessus. Après la destruction de la cible, un intervalle de temps variable de 1 à 2s était respecté. La phase expérimentale était composée de 80 essais : 40 essais par type de repère (visuel/auditif), répartis en 20 essais non prédictifs, 10 essais valides (5 à l'avant et 5 à l'arrière) et 10 essais invalides (5 avec apparition de la cible à l'avant et 5 à l'arrière) et 20 essais prédictifs (10 à l'avant et 10 à l'arrière). La durée totale de l'expérience était de 30 minutes, dont une session expérimentale d'au moins 20 minutes. Cette durée a été choisie en raison des contraintes liées à la réalité virtuelle (fatigue oculaire, cybersickness, inconfort) afin que les participants vivent l'expérience dans les meilleures conditions possible sans que cela ait d'impact sur leurs processus attentionnels. Avant la phase expérimentale, les participants ont effectué 16 essais à titre d'entraînement (4 essais par type de repère et blocs de prédictivité) afin de s'assurer que les instructions sont bien suivies et que les participants s'habituent aux indices fournis.

Analyse de donnée

Variable Dépendante

Nous avons enregistré deux temps de réponse oculaire différents, *Initiation-Regard* et *Cible-*

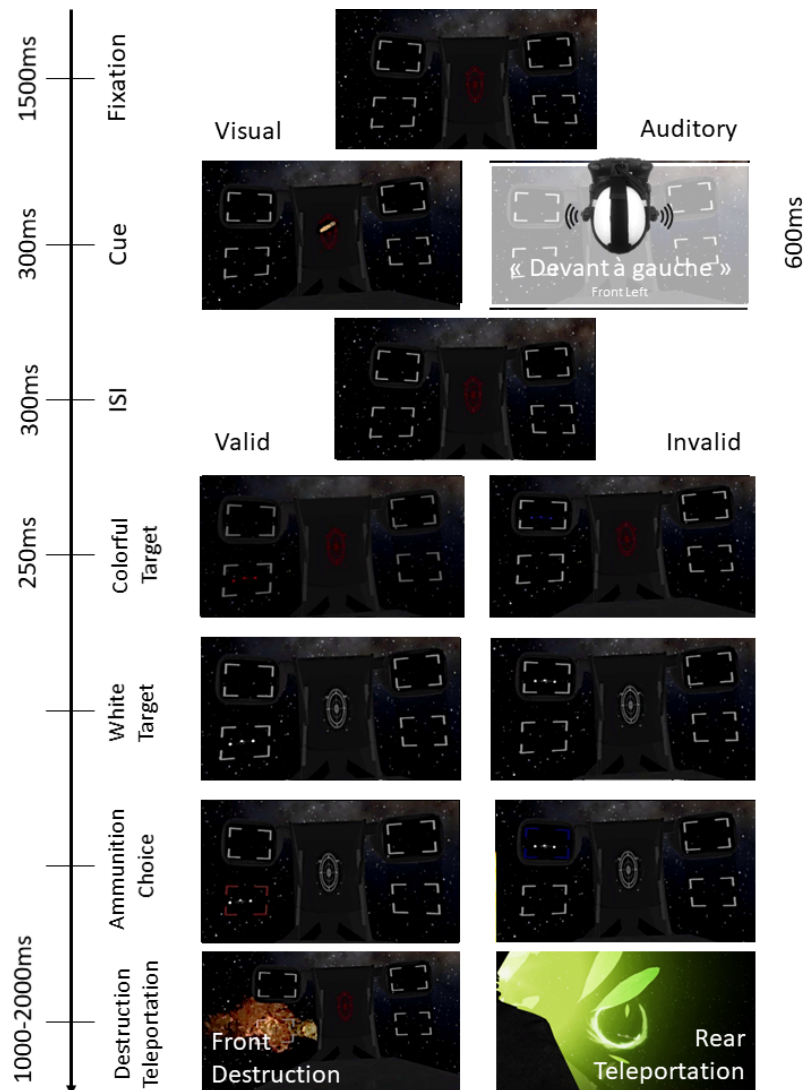


Figure 3.9. Déroulement d'un essai (de haut en bas).

Vue, qui débutent tous deux à l'apparition de la cible. *Initiation-Regard* correspond au moment où le participant ne regarde plus le point de fixation, et *Cible-Vue* au moment où le participant regarde le viseur / rétroviseur correspondant à la position de la cible (réponse

oculaire). Nous avons également enregistré un temps de réponse moteur, *Choix–Munition* qui correspond au moment où le participant appuie sur le bouton du contrôleur de réalité virtuelle après l'apparition de la cible.

Filtre

Les TR inférieurs à 0,05s ont été exclus de l'analyse car ils sont au-delà des capacités des performances humaines et représentent donc nécessairement une erreur de mesure. Les TR supérieurs au TR moyen + 2*std ont été considérés comme trop lents et retirés de l'analyse (0,887s pour *Initiation–Regard*(0,567+(2*0,16)) ; >1,033s pour *Cible–Vue*(0,639+(0,197*2)) ; >1,521s pour *Choix–Munition* (0,951+(2*0,285)). Un participant a été exclu des analyses pour *Initiation–Regard* et *Cible–Vue*, en raison d'un nombre trop élevé d'essais exclus compte tenu des critères définis ci-dessus.

Essai et analyse

L'analyse statistique comprend $72,68 \pm 9,34$ essais par participant pour les TR de *Initiation–Regard*, $73 \pm 10,04$ essais par participant pour les TR de *Cible–Vue* et $71,36 \pm 12,34$ essais pour *Choix–Munition*. Nous avons utilisé le logiciel JASP pour effectuer une analyse de variance à mesures répétées à trois facteurs (RMANOVA) sur les TR moyens pour chaque variable dépendante afin d'observer l'effet de nos facteurs manipulés : Prédicativité (100%/50%), Modalité (visuelle/auditive) et Localisation de la cible (avant/arrière). Une autre RMANOVA a été réalisée sur la précision des réponses relatives au choix des munitions avec les mêmes facteurs expérimentaux. La correction de Bonferroni a été utilisée pour la comparaison post-hoc.

3.3.3 Résultats

Table 3.1

Descriptives

Modalité	Validité	Localisation	Moyenne	SD	N
Visuelle	Neutre	Derrière	0.880	0.214	21
		Devant	0.828	0.172	21
	Valide	Derrière	0.836	0.181	21
		Devant	0.766	0.190	21
Auditive	Neutre	Derrière	0.898	0.234	21
		Devant	0.852	0.240	21
	Valide	Derrière	0.848	0.211	21
		Devant	0.807	0.215	21

Mouvements des yeux

Pour *Initiation-Regard* et *Cible-Vue*, l'analyse n'a révélé aucun effet significatif des facteurs manipulés après l'apparition de la cible. Ces résultats sont cohérents avec une orientation couverte de l'attention, sans mouvement des yeux.

Précision

Pour la mesure *Choix-Munitions*, l'analyse effectuée sur la précision des réponses n'a pas révélé d'effet principal significatif. Cependant, il existe une interaction entre les facteurs modalité (visuelle/auditive) et emplacement de la cible (avant/arrière) ($F(1, 20) = 1.817, p = < 001, \eta^2 = 0.035$). Les comparaisons post hoc révèlent que la précision des réponses est significativement plus élevée pour les indices auditifs que pour les indices visuels lorsque l'indice apparaît devant les sujets ($p = 0,006, MD = 0,045$). De plus, la

précision des réponses est significativement plus élevée lorsque la cible apparaît à l'avant plutôt qu'à l'arrière pour les indices visuels ($p = 0.036$, $MD = 0.012$).

Temps de réponse

En ce qui concerne les temps de réponse, l'analyse a révélé un effet principal significatif de la prédictivité de l'indice (voir figure 3.10) sur les temps de réponse des sujets, comme attendu ($F(1, 20) = 8.390$, $p = .009$, $\eta^2 = 0.063$). Les participants obtiennent des temps de réponse moyens significativement plus courts dans les blocs où l'indice est toujours valide par rapport aux blocs où l'indice est invalide la moitié du temps ($MD = 50ms$). De plus, il existe un effet principal significatif de l'emplacement de la cible (voir figure 3.11) sur le temps de réponse des sujets ($F(1, 20) = 7.392$, $p = .013$, $\eta^2 = 0.068$). Les temps de réponse moyens des participants sont significativement plus rapides lorsque la cible apparaît devant eux plutôt que derrière ($MD = 53ms$). Aucun autre effet significatif n'a été observé.

3.3.4 Conclusion

L'objectif de cette étude était d'étudier les différences lorsque l'attention d'une personne est orienté vers l'espace devant elle ou vers l'espace derrière elle. Pour cela, nous avons utilisé une version modifiée du Paradigme de Posner en réalité virtuelle pendant une tâche de discrimination de couleur de vaisseau spatial virtuelle. Nous avons utilisé deux types d'indices pour orienter l'attention des sujets : une flèche directionnelle et une instruction vocale. Nous avons également manipulé la prédictivité de l'indice qui pouvait être prédictif (indice valide à 100%) ou non prédictif (indice valide à 50 %, indice invalide à 50 %). Nous avons effectué trois mesures : la latence d'initiation du mouvement oculaire vers la cible après son apparition, c'est-à-dire le moment où la personne déplace les yeux du point de fixation central. Mais aussi, l'intervalle entre l'apparition de la cible et le moment où la cible

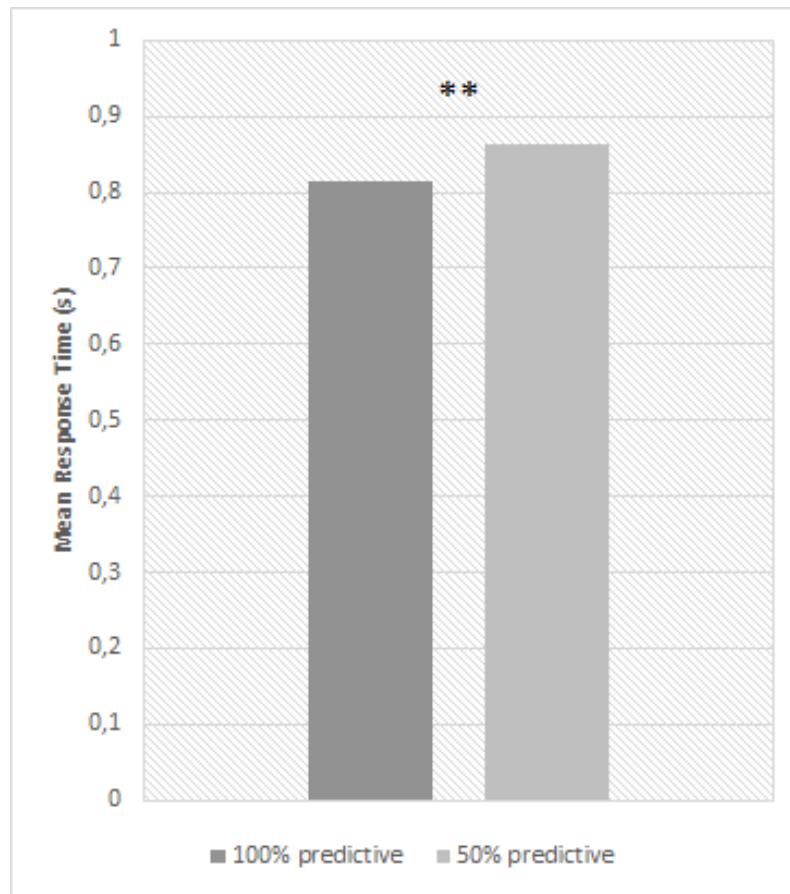


Figure 3.10. Moyenne des temps de réponses pour *Choix-Munitions* en fonction de la prédictivité de l'indice $** = p < .01$

est regardée ouvertement. Et, le moment où la personne sélectionne les munitions à utiliser en fonction de la couleur du vaisseau après l'apparition de la cible.

Mouvements des yeux

En ce qui concerne l'initiation du mouvement des yeux vers la cible et le moment où la personne regarde la cible, nous n'observons pas d'effet significatif de la prédictivité de

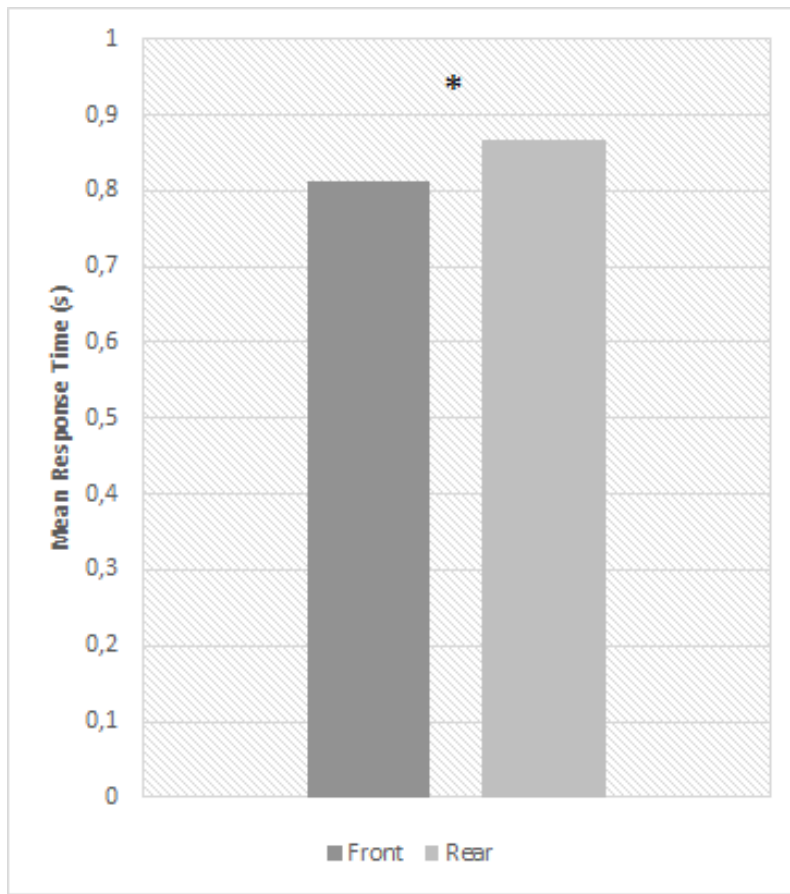


Figure 3.11. Moyenne des temps de réponses pour *Choix-Munitions* en fonction de la localisation de la cible** = $p < .05$

l'indice, contrairement à ce qui était attendu. Une explication possible est que l'ajout d'une réponse motrice a eu un impact sur les mesures oculaires. En effet, il a été montré que les résultats obtenus avec le paradigme de Posner variaient si les participants recevaient l'instruction de répondre en appuyant sur une touche de réponse (réponse motrice) ou par des saccades oculaires (Taylor & Klein, 2000). Dans notre expérience, seule une réponse motrice était demandée au participant, contrairement à l'étude de Soret et al. (2020) qui

demandait uniquement des réponses oculaires et n'introduisait pas de réponses motrices. Dans cette étude, les participants devaient regarder la cible pour pouvoir la verrouiller, mais ce verrouillage pouvait être effectué avant ou après le choix des munitions. Par conséquent, l'absence d'effet sur les mouvements oculaires des sujets suggère que les participants n'ont pas utilisé leurs yeux pour les aider à réaliser la tâche et ont utilisé une orientation couverte.

Temps de réponse et précision des réponses

Effet de la prédictivité

En ce qui concerne les temps de réponse moteurs des sujets, nous observons comme prévu un effet principal de la prédictivité de l'indice. Les participants répondent plus rapidement lorsque le repère est informatif (100 % de prédictivité) que lorsqu'il ne l'est pas (50 % de prédictivité). Cela signifie que les participants traitent l'information plus rapidement lorsqu'ils peuvent orienter efficacement leur attention que lorsqu'ils ne le peuvent pas. Cependant, aucun effet de la prédictivité de l'indice n'a été observé sur la précision de la réponse (ACC). Il semblerait que dans cette expérience, bien que l'orientation de l'attention permette aux participants de répondre plus rapidement aux informations ciblées, elle ne leur permet pas d'améliorer l'identification de la cible. Néanmoins, comme le taux de réponses correctes était particulièrement élevé (ACC moyen = 94%), il est possible que la tâche de discrimination n'ait pas été suffisamment difficile pour mettre en évidence une différence. De futures expériences pourraient augmenter la difficulté de la tâche pour explorer ce point.

Cependant, nous notons que l'indice auditif semble fournir une meilleure précision que l'indice visuel lorsque la cible apparaît à travers les vitres transparentes et qu'aucune différence de modalité n'est observée lorsque la cible apparaît dans les miroirs. Il apparaît également que l'indice visuel fournit une meilleure précision lorsque la cible apparaît à

travers les fenêtres transparentes que dans les miroirs. Ces résultats sont inattendus et nous n'avons aucune hypothèse à ce niveau. Il semble prématuré de faire une quelconque interprétation ou conclusion sur ces résultats. Des études complémentaires sont nécessaires.

Effet de la localisation de la cible

Les résultats montrent un effet principal de la localisation de la cible. Les participants ont réagi plus rapidement lorsque la cible apparaissait à travers les vitres transparentes (avant) plutôt que dans les rétroviseurs (arrière). Similaire aux résultats de Soret et al. (2020) ; il semble y avoir une différence dans le traitement lorsqu'une information est associée ou non à une autre information en dehors de l'espace frontal des sujets. Une explication possible est qu'il existe une différence dans le processus d'orientation attentionnelle dans l'espace arrière et dans l'espace avant comme suggéré dans les études sur l'orientation crossmodale (?). Pour valider cette hypothèse, d'autres études sont nécessaires, notamment par l'enregistrement de mesures neurophysiologiques telles que l'électroencéphalographie (EEG) ou l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf).

Néanmoins, une autre explication possible pourrait être une différence dans la représentation spatiale nécessaire lorsque nous dirigeons notre attention vers une région sélectionnée de l'espace. En effet, nous savons que nous utilisons deux types de cadre spatial pour encoder l'espace qui nous entoure. Un cadre spatial égocentrique, où la position des objets est codée par rapport à notre propre position et un cadre spatial allocentrique, où la position des objets est codée indépendamment de la position actuelle du sujet et sont centrés sur les objets présents dans l'environnement (Paillard, 1991; Pani & Dupree, 1994). Il est possible que lorsque l'information est perçue à travers un miroir (ou un rétroviseur), nous devons effectuer un changement de cadre spatial pour déterminer l'emplacement réel de l'objet à traiter. En effet, pour diriger notre attention, nous devons déterminer la région

de l'espace à privilégier en appelant une représentation de l'espace associée à cette région. Chaque cadre de référence crée sa propre représentation. Lorsque nous percevons une information directement, l'appel à une représentation spatiale égocentrique est suffisant. Néanmoins, lorsque nous percevons une information à travers un miroir, il est possible que nous devions passer d'une représentation égocentrique (où est le miroir par rapport à moi) à une représentation allocentrique (où est le miroir par rapport à l'information que je dois traiter) pour déterminer la région de l'espace qui nécessite un traitement privilégié. Ainsi, les temps de réponse sont impactés et sont plus lents que lorsque l'information est perçue directement en face de nous. Il serait intéressant que de futures études étudient cette hypothèse.

3.3.5 Discussion

En résumé, nos résultats montrent que les indices informatifs améliorent la vitesse de traitement dans une tâche de discrimination en réalité virtuelle, un environnement qui gagne en validité écologique par rapport à un environnement expérimental standard. Aucun effet sur l'identification des cibles n'a été observé en fonction de la validité de l'indice. De plus, il apparaît que les cibles perçues devant les sujets, mais associées à des informations situées derrière eux (informations réfléchissantes au moyen de rétroviseurs) impactent la vitesse de traitement de ces cibles par rapport à des informations purement frontales. Ces résultats pourraient conduire au développement de systèmes de guidage utilisant des informations réflexives pour diriger l'attention des individus vers des événements importants nécessitant un traitement au-delà de l'espace frontal directement perçu. Par exemple, dans des situations à forte demande attentionnelle et qui nécessitent parfois des temps de réaction extrêmement rapides pour garantir la sécurité des personnes, comme la conduite automobile, l'aviation ou les urgences médicales.

3.4 Paradigme de Posner à 360°, un nouveau paradigme expérimental ?

Cette expérience a été soumise en tant que "Registered Report" pour une publication dans "Scientific Report". Dans ce type de publication, l'introduction et la méthode font l'objet d'une évaluation par les pairs avant les passations expérimentales. Cette expérience n'a donc pas encore été réalisée et seule la première phase (stage 1) du "Registered Report" est reportée ici. Cette expérience est le fruit des résultats des expériences précédentes réalisées en réalité virtuelle. Nous avons vu que l'utilisation de miroir peut permettre d'étudier le déploiement de l'attention dans l'espace arrière en réalité virtuelle. C'est-à-dire, la préparation du traitement d'une information visuelle perçue devant nous, mais qui existe en réalité derrière nous (ou plus largement en dehors du FOV). Nous avons souhaité proposer un protocole expérimental pour l'étude de l'orientation à 360°

3.4.1 Introduction

On ignore encore comment l'orientation attentionnelle fonctionne lorsque l'attention d'une personne doit être déplacée hors du champ visuel, en particulier dans l'espace arrière. Nous savons qu'il existe des différences dans l'interaction intermodale dans les espaces avant et arrière à l'aide d'indices auditifs (voir Spence et al., 2017, pour une revue), mais de nombreuses questions demeurent. La difficulté méthodologique réside dans le fait qu'il est difficile de présenter des indices visuels associés à des objets réels dans l'espace arrière. Nous proposons d'aborder cette question difficile avec une version modifiée du paradigme de Posner en utilisant des écrans multiples. Cela pourrait ouvrir un nouveau champ d'investigation dans l'étude de l'orientation attentionnelle, l'orientation dans l'espace arrière, afin d'approfondir les bases neurales des mécanismes d'orientation. Si certains

auteurs ont suggéré d'utiliser un rétroviseur pour étudier le traitement de l'orientation attentionnelle dans l'espace arrière (Ho & Spence, 2005; Soret et al., 2020), son contenu n'a jamais été associé à des informations du monde réel derrière le participant. Nous proposons d'utiliser des indices visuels et des cibles visuelles présentées sur un écran central à l'avant et qui sont associés à quatre écrans autour du participant (avant et arrière, gauche et droite). Les participants réaliseront une tâche de discrimination (orientation d'un patch de Gabor) en utilisant des indices prédictifs. La perception de la localisation spatiale sera induite chez les sujets en leur demandant de vérifier si les informations contenues sur l'écran central sont identiques à celles d'un écran situé autour d'eux. Une expérience de contrôle identique sans écrans autour garantira que les résultats sont attribuables à l'aspect spatial du paradigme de Posner modifié et non à d'autres facteurs.

Nous supposons l'existence d'un traitement attentionnel différent dans l'espace arrière par rapport à l'espace avant. Le déplacement de l'attention dans l'espace arrière pourrait impliquer une étape de traitement supplémentaire indexée par les temps de réaction des sujets. Pour tester cette hypothèse, en suivant la méthode des facteurs additifs (Sternberg, 1969), si deux facteurs affectent les temps de réaction des sujets de manière indépendante (effet principal sans interaction), alors on peut supposer qu'ils représentent deux étapes de traitement et impliquent des processus qui opèrent séparément (Sternberg, 2013). Si l'orientation attentionnelle dans les espaces avant et arrière implique des étapes de traitement différentes, nous devrions observer un effet principal de la validité et un effet principal de la localisation de la cible (avant/arrière). Le temps de réponse moyen et la précision devraient être meilleurs en réponse à des indices valides dans l'espace avant que dans l'espace arrière (effet additif). Cependant, cet effet additif ne devrait être observé que pour l'expérience de contrôle. Ainsi, nous devrions observer une interaction significative entre nos trois facteurs expérimentaux : validité de l'indice (valide/invalid), localisation de la cible (avant/arrière),

et écrans environnants (avec/sans). Cette interaction devrait montrer un effet de validité de l'indice dans toutes les conditions. Cependant, l'effet de localisation de la cible devrait être observé lorsque les écrans autour du sujet sont associés à l'écran principal mais, pas lorsqu'il n'y a pas d'écrans environnants, indépendamment de la validité de l'indice. (Voir le tableau 1 pour plus de détails sur cette hypothèse).

3.4.2 Méthode

Information Éthiques

Conformément à la Déclaration d'Helsinki, tous les participants donneront leur consentement écrit avant l'expérience. Les participants ne recevront aucune contribution pour leur participation.

Matériel

La tâche de Posner modifiée a été développée à l'aide de MATLAB et de Psychtoolbox. Nous utiliserons le système d'eye-tracking à distance EyeLink 1000 Plus avec un taux d'échantillonnage de 2 kHz, une précision de $0,25^{\circ}$ - $0,5^{\circ}$ et une résolution de $0,01^{\circ}$ RMS. Les écrans entourant les participants sont quatre Dell P2417H de 23,8" avec une résolution de 1920x1080 pixels et un taux de rafraîchissement de 60 Hz. L'écran principal est un BENQ Zowie XL2430 de 24" avec une résolution de 1920x1080 pixels et un taux de rafraîchissement de 144 Hz. Les réponses sont données via une boîte à réponses Black Box Toolkit. L'ordinateur pour la présentation des stimuli est un SR Research PC 11807 fonctionnant sous Windows 7. L'eye-tracker dispose d'un ordinateur dédié à l'acquisition des données Dell OptiPlex XE2 SFF connecté à l'ordinateur utilisé pour le programme MATLAB.

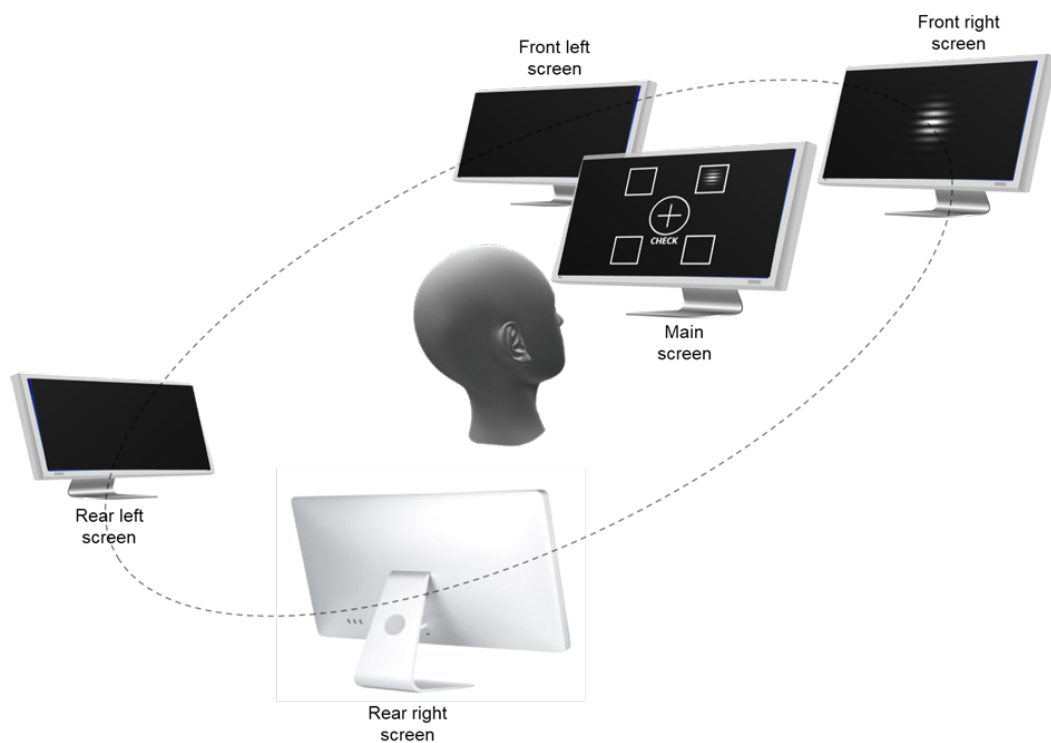


Figure 3.12. Illustration du setup expérimentale utilisée

Simuli

Les cibles sont des patches de Gabor produits avec un générateur de patches en ligne. Avec une orientation de 0° (verticale) ou 90° (horizontale), un fond noir et une ligne blanche. Les stimuli sont affichés sur l'écran selon les coordonnées des pixels (j_n, h_n) fournies dans la figure ci-dessous (3.13).

Procédure

Dans la phase expérimentale, les sujets devront identifier le plus rapidement et le plus précisément possible l'apparition d'un stimulus visuel à l'aide d'un indice préalablement

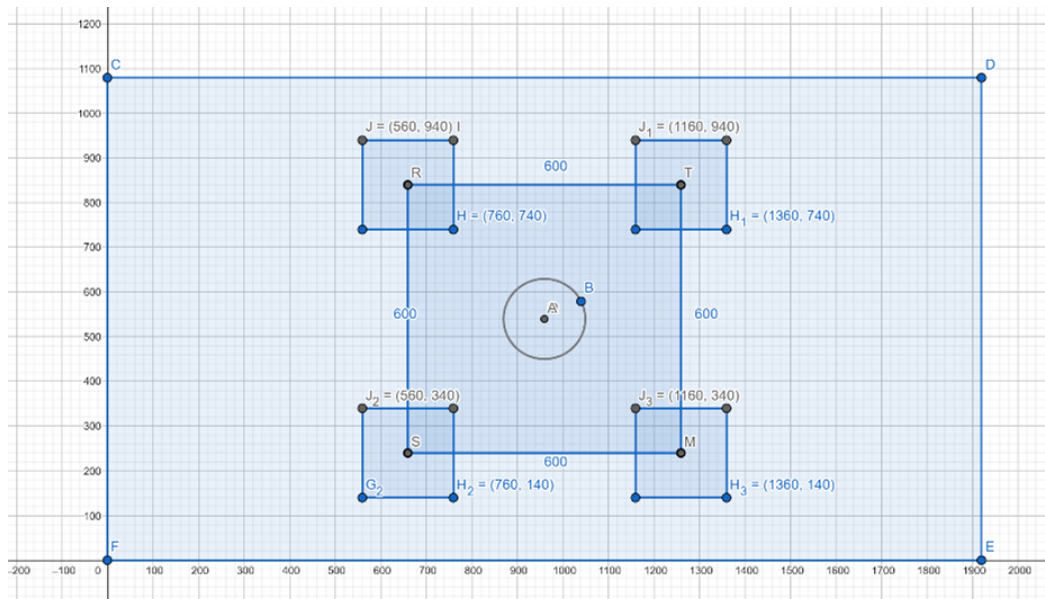


Figure 3.13. Coordonnées en pixels et position des carrés qui contiendront les cibles. Le point de fixation est positionné au centre de l'écran (A). Les carrés sont définis par leurs coordonnées (x,y) du coin supérieur gauche (jn) et leurs coordonnées (x,y) du coin inférieur droit (hn). Chaque carré est distant de 600 pixels de ses deux plus proches voisins.

fourni. Ce stimulus visuel peut apparaître dans l'un des 4 cercles numérotés aléatoirement de 1 à 4 (Figure 3.14). Chaque cercle sera associé à un écran situé autour du sujet (avant gauche, avant droit, arrière droit, ou arrière gauche). L'indice fourni au participant sera une flèche dans la direction des boîtes où la cible doit apparaître. Après l'apparition de la cible, si le participant est invité à "vérifier", il devra regarder la cible sur l'écran autour de lui, qui sera associé à la zone où la cible est apparue sur l'écran principal (information miroir). Ensuite, il/elle devra répondre à nouveau en se référant à cette cible. Avant la phase expérimentale,

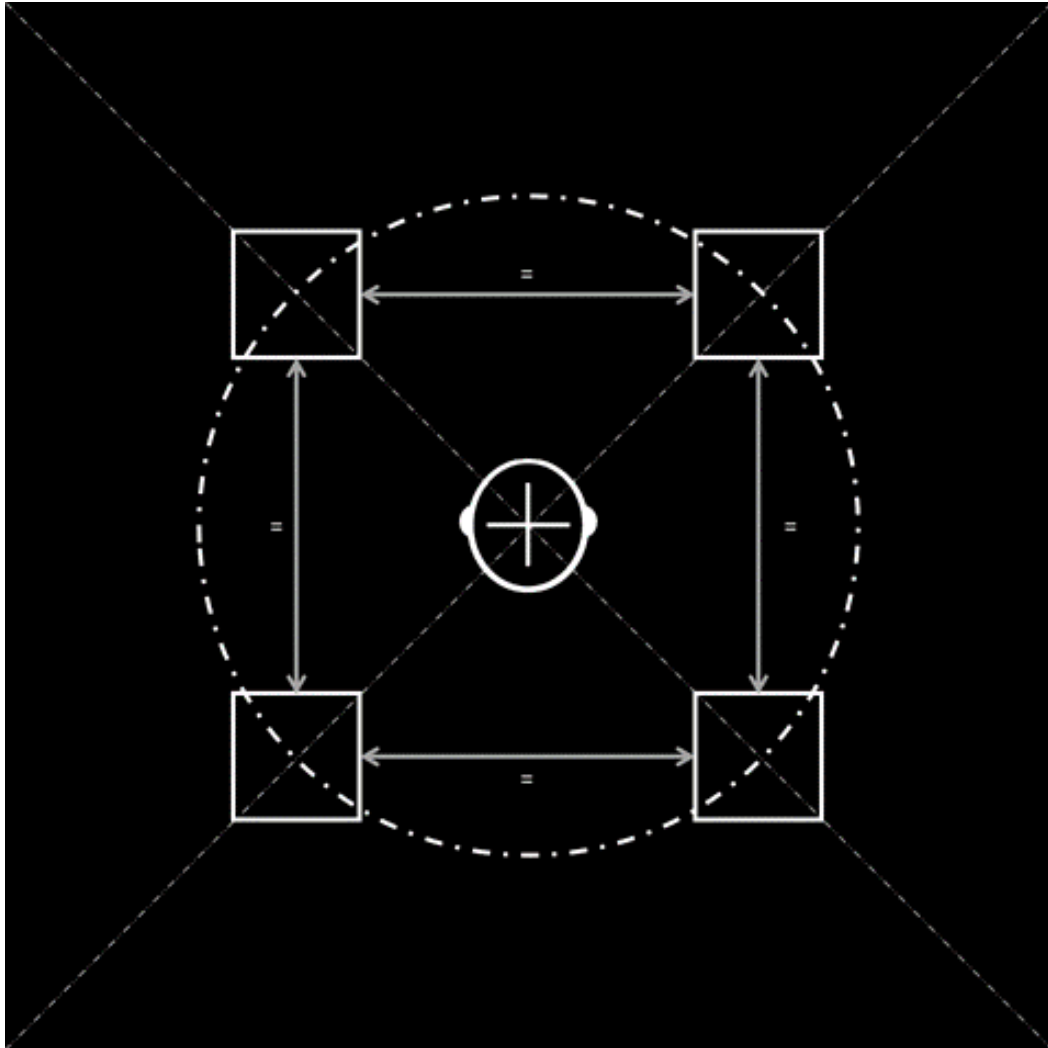


Figure 3.14. Configuration de l'écran principal. Le point de fixation est placé au centre de l'écran. Les boîtes contenant les cibles sont toutes équidistantes du point de fixation (sur un cercle de 800 pixels). Chaque boîte est équidistante de 600 pixels des boîtes voisines (verticalement et horizontalement).

une session d'entraînement avec des "vérification" systématiques permettra à chaque sujet de se familiariser avec les indices et de les associer à un emplacement spatial spécifique autour de lui. L'indice aura une prédictivité de 75%. Dans 75% des essais, le repère sera valide et indiquera la position correcte de la cible, tandis que dans 25% des cas, le repère indiquera une position erronée de la cible. Tous les essais seront randomisés. Lorsque l'indice sera invalide, la cible apparaîtra la moitié du temps dans la case verticalement opposée à la case indiquée et la moitié du temps dans la case horizontalement opposée. La cible n'apparaîtra jamais dans une position diamétralement opposée à la case indiquée par l'indice. Les cibles seront un patch de Gabor avec des lignes verticales ou horizontales associées à un bouton de réponse spécifique sur le clavier de réponse. Les boutons de réponse seront répartis de manière équilibrée entre les sujets. L'intervalle de temps entre la fin de l'apparition de l'indice et le début de l'apparition de la cible (ISI) sera de 500 ms. Nous avons choisi cet intervalle car il permet d'observer les effets d'une orientation endogène, généralement observés à des ISI de 300 à 1000 ms. Nous ne manipulerons pas l'ISI pour éviter un plan expérimental complexe.

La phase expérimentale de l'expérience principale sera composée de 240 essais par participant : 192 essais valides (96 essais avant et 96 essais arrière) et 48 essais invalides (24 essais avant et 24 essais arrière). La phase d'entraînement sera composée de 90 essais par participant : 24 essais valides (12 essais avant et 12 essais arrière) et 6 essais invalides (3 essais avant et 3 essais arrière). La phase de contrôle sera la même que la phase expérimentale, mais sans écrans autour des participants.

Un eye-tracking sera utilisé pour vérifier que les participants ne bougent pas les yeux avant l'apparition de la cible (une tâche classique de Posner en version couverte). Un contrôle de dérive (drift control) sera effectué au début de chaque bloc pour corriger tout changement de placement par les participants lors de la vérification des informations sur les écrans qui l'entourent. Une analyse a posteriori sera effectuée sur les mouvements oculaires afin

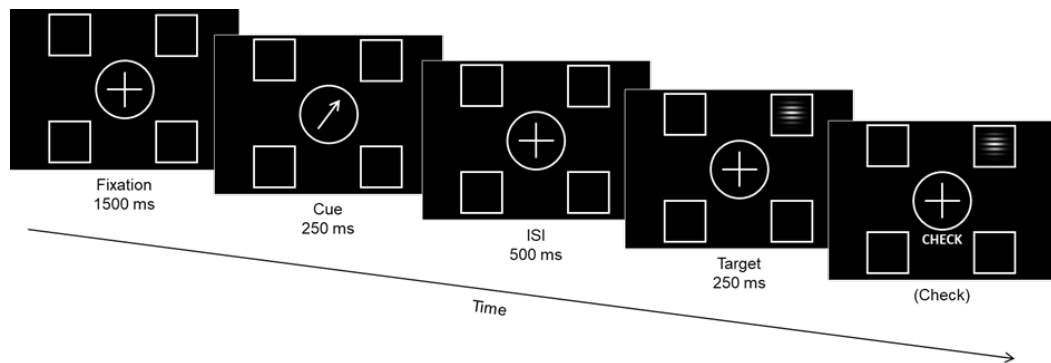


Figure 3.15. Déroulement d'un essai pour un indice valide ou invalide. Le sujet maintient son regard sur le point de fixation (1) pendant 1,5s, une flèche endogène valide ou invalide dirige l'attention du sujet vers l'un des quatre emplacements (2). Après un intervalle inter-stimulus de 500 ms (3), la cible visuelle "au patch de Gabor horizontale" apparaît à l'endroit indiqué par l'indice (indice valide) ou à un mauvais endroit (indice invalide) pendant 100 ms (4). Le participant répond en appuyant sur la touche de réponse correspondant au patch Gabor horizontale. Si l'instruction CHECK est affichée (5), le participant est invité à vérifier l'écran correspondant et à préciser la cible vue sur cet écran en appuyant sur la touche de réponse correspondant au symbole perçu sur cet écran. (6). Si l'instruction CHECK n'apparaît pas, l'essai s'arrête à la phase d'apparition de la cible (4).

d'explorer si une différence dans la latence saccadique ou le temps de fixation peut indiquer l'implication de processus d'orientation dans l'espace avant ou l'espace arrière. Il serait alors possible de déterminer par des mesures oculaires si les individus sont focalisés sur leur espace avant ou autre part. Ce suivi oculaire pourrait également nous aider à identifier toute

éventuelle implication de l'attention ouverte dans notre étude.

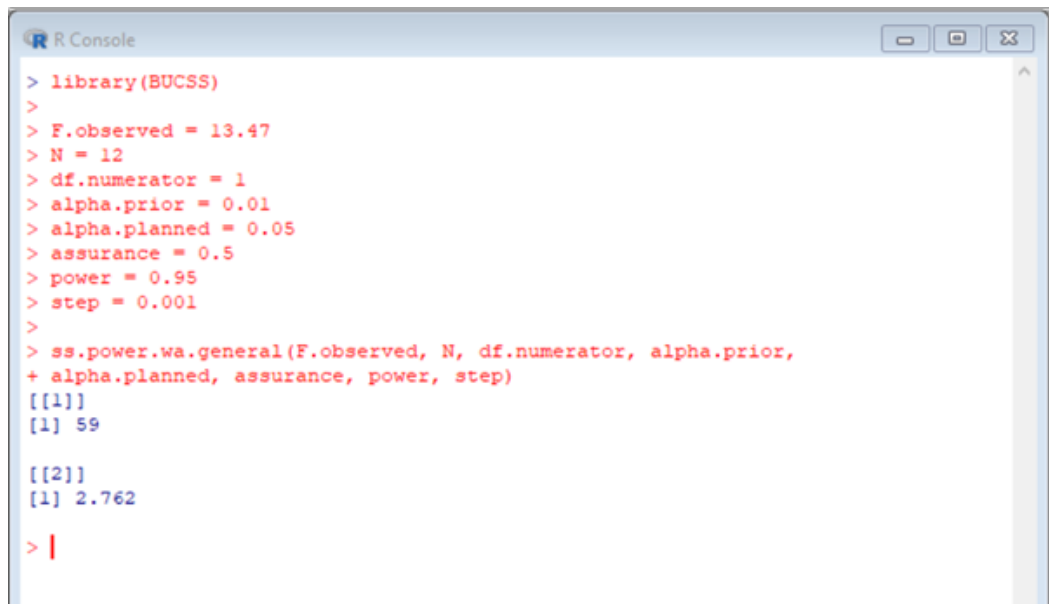
Taille de l'échantillon

Pour calculer la taille de l'échantillon nécessaire à notre expérience, nous nous sommes basés sur l'étude de Ho et Spence (2005). Plus précisément, nous avons choisi l'expérience 4 dans laquelle ils ont utilisé un indice endogène prédictif (validité de 80%) (le mot "avant" ou "arrière") pour diriger l'attention des sujets. Cette expérience est la plus proche de notre plan expérimental. En effet, notre expérience vise à montrer des effets similaires à cette expérience, mais avec une orientation visuelle intramodale de l'attention. Nous nous attendons à une interaction entre la validité de l'indice et la localisation de la cible réfléchie, ce qui correspond à l'interaction observée entre la direction de l'indice auditif et la localisation du stimulus visuel dans la 4e expérience de Ho et Spence (2005). Nous avons utilisé le package R BUCSS développé et proposé par Anderson, Kelley et Maxwell en 2017 dans leur article : Sample-size planning for more accurate statistical power : a method adjusting sample effect sizes for publication bias and uncertainty (voir Figure 3.16). La taille d'échantillon estimée nécessaire pour notre étude est de 59 personnes.

3.4.3 Plan d'analyse

Filtre et critère d'exclusion

Pour toutes les phases : les temps de réponse inférieurs à 50 ms pour chaque participant seront retirés de l'analyse des données. En effet, des temps de réponse inférieurs à 50 ms n'ont jamais été observés dans les études sur l'orientation attentionnelle et les minima sont proches de 100 ms. Un temps de réponse inférieur à 50 ms sera donc considéré comme trop rapide et sera considéré comme une erreur de mesure. De même, les temps de réponse de plus de 1,4s sont généralement exclus car ils sont trop longs et indiquent une baisse de vigilance du



```
> library(BUCSS)
>
> F.observed = 13.47
> N = 12
> df.numerator = 1
> alpha.prior = 0.01
> alpha.planned = 0.05
> assurance = 0.5
> power = 0.95
> step = 0.001
>
> ss.power.wa.general(F.observed, N, df.numerator, alpha.prior,
+ alpha.planned, assurance, power, step)
[[1]]
[1] 59

[[2]]
[1] 2.762

> |
```

Figure 3.16. Capture d'écran de la console du logiciel R pour le calcul de la taille de l'échantillon nécessaire. Pour plus d'informations sur le package BUCSS et les différents paramètres utilisés, voir :

<https://cran.r-project.org/web/packages/BUCSS/index.html>.

participant qui s'est probablement désengagé de la tâche pour l'essai en question. En outre, nous considérons que les participants dont la précision moyenne est inférieure à 70% ou dont le temps de réponse moyen est supérieur à 2 secondes ont échoué à la tâche et seront donc exclus des analyses et considérés comme des outliers. Aucune donnée ne sera remplacée ; si les données d'un participant contiennent trop de valeurs manquantes selon nos critères d'exclusion, le participant sera exclu de l'analyse.

Analyse a priori

Comme les plans expérimentaux sont des plans intra-sujet, c'est-à-dire que tous les participants

seront confrontés à toutes les modalités de nos facteurs expérimentaux, les analyses statistiques seront toutes des analyses de variance à mesures répétées sur le temps de réponse moyen (RT) et la précision (ACC). Les analyses statistiques seront une analyse de variance à trois facteurs répétées (RMANOVA) sur les temps de réponse moyens des sujets (TR) et la précision des réponses (ACC) afin d'observer les effets des variables manipulées : validité de l'indice (valide/invalid), localisation de la cible (avant/arrière) et écrans environnants (avec/sans). Des tests HSD Tukey seront utilisés pour les comparaisons post-hoc.

Analyse des effets simples

Étant donné que nous nous attendons à une interaction significative entre nos trois facteurs expérimentaux, nous effectuerons une analyse de l'effet simple de la localisation de la cible en fonction de la présence d'écran environnant et de la validité de l'indice. Nous nous attendons à un effet significatif de l'emplacement de la cible pour les indices valides et invalides uniquement lorsque des écrans sont associés à l'écran principal.

Analyse a posteriori

Nous effectuerons une analyse a posteriori sur les données oculaires recueillies pendant l'expérience. Nous effectuerons une analyse de variance à mesures répétées sur la latence saccadique lors de l'apparition de la cible. Il s'agit du temps d'initiation de la saccade oculaire vers la cible après son apparition, ce qui correspond au moment où la personne quitte le point de fixation. Nous effectuerons la même analyse sur les vitesses saccadiques après son apparition, c'est-à-dire sur la vitesse du mouvement oculaire vers la cible dès que le participant peut la voir. Tous ces temps de réponse oculaire débiteront au moment de l'apparition de la cible, puisque les participants ont pour consigne de ne pas bouger les yeux avant l'apparition de la cible. La latence saccadique pourrait être plus faible en réponse à des indices valides qu'à des indices non valides. La vitesse de la saccade vers la cible

pourrait également être plus rapide pour les indices valides. L'analyse des microsaccades pourrait également fournir des informations intéressantes sur le comportement oculaire des participants pendant la tâche.

3.5 Conclusion générale du chapitre

Dans cette partie de la thèse, nous avons utilisé des versions modifiées du paradigme de Posner afin d'étudier l'orientation de l'attention à 360°. C'est-à-dire, l'orientation de l'attention au-delà de l'espace frontal directement perçu (FOV). En effet, dans la vie de tous les jours, nous orientons notre attention tout autour de nous et non uniquement devant nous. Lorsque l'on entend une voiture arriver au loin, que nous voulions regarder quelqu'un discrètement, ou encore quand nous avons l'impression que quelqu'un nous observe dans notre dos ; notre attention n'est pas dirigée là où notre regard semble l'indiquer. Cette orientation vers une zone de notre environnement qui est "cachée" et que nous avons appelé espace arrière, c'est-à-dire l'espace au-delà du FOV, a été très peu étudié. Ce n'est même que récemment que nous nous sommes intéressés au paradigme de Posner au-delà des étroits 60° de champs de vision centrale habituellement étudié (voir par exemple, To, Regan, Wood, & Mollon, 2011; Weiß, 2020). L'une des raisons est la difficulté méthodologique de l'étude des processus d'orientation vers des informations cachée et probablement la domination des études sur les processus d'attention ouverte (étude des mouvements oculaires) au détriment des processus d'attention couverte, souvent qualifiés d'artificiels par les experts du domaine. En effet, beaucoup considèrent que restreindre les mouvements oculaires des participants lors de la réalisation d'une tâche de Posner est une méthode très synthétique de traitement de l'information visuelle et que les individus utiliseront autant que possible leurs yeux dans la vie réelle. Cependant, si cette consigne est fournie au participant, c'est pour pouvoir observer un mécanisme difficile à mesurer, autrement non observable. Nous pensons que l'orientation couverte est loin d'être un simple mécanisme artificiel qui ne produit des effets que dans des conditions extrêmement contrôlées de laboratoire. Nous pensons que l'attention peut se déployer aisément sans mouvement oculaire vers des régions de l'espace qui dépasse notre champ de vision centrale limité, justement par sa capacité à être indépendante des

mouvements oculaires. Nous pensons que l'attention en tant que processus de sélection de l'information est capable de se déclencher au sein même de notre représentation de l'espace, non par perçu, mais construite. N'oublions pas que nous ne percevons pas passivement l'information que nous recevons de notre environnement. "La perception ne peut pas se concevoir comme une simple copie du monde, par réception passive de stimulus externe. Des facteurs internes propres au sujet interviennent au cours de la construction de la représentation perceptive. L'objet perçu est construit par le sujet" (Roulin, 2006). Cette construction de l'objet intègre probablement la position réelle de l'objet dans l'espace qui peut avoir un impact sur les processus attentionnels déployer pour son traitement. Ainsi, il est essentiel de dépasser l'approche assez réductionniste classique utilisée sur les études de l'orientation de l'attention et de s'ouvrir à une approche plus globale, plus appliquée, d'un individu en évolution dans un environnement dynamique et complexe qui intègre la totalité du monde qui l'entoure dans un système de représentation afin d'y évoluer le plus efficacement possible.

Nous avons ainsi pu montrer que les mécanismes d'orientation de l'attention se déploient en environnement immersif et écologique à 360°. Nous avons élargi l'environnement expérimental, en passant des 60° de FOV habituelle utilisée, à 360° de FOR. Nous avons réappris l'importance de considérer la place de l'individu dans un environnement plus complexe qu'un setup standard de laboratoire limiter au traitement d'information frontale sur un écran placé devant les individus. Nous avons mis en place une modification du paradigme de Posner dans lequel des informations pouvaient être perçues à travers des miroirs, reflet de l'espace visuel au-delà de ce que nous pouvons percevoir sans bouger les yeux, la tête ou le corps. De par cette modification, nous avons réintégré la totalité de l'environnement des sujets tels qu'il existe au quotidien. En effet, dans la vie de tous les jours, une information importante est capable de surgir n'importe où dans notre environnement et nous devons explorer notre environnement en bougeant et interagissant avec lui pour nous construire une

représentation du monde dans laquelle nous évoluons. Cette représentation du monde ainsi construite est probablement un support de base pour la sélection de l'information et son traitement afin de nous adapter de la meilleure des façons et garantir notre survie. Nous avons pu observer des différences de traitement lorsqu'une information est perçue directement devant nous ou perçue devant nous, mais reflète d'une information autre part dans notre environnement. Cette différence de traitement suggère que les processus mis en jeu dans l'orientation de l'attention dans l'espace visuelle frontale (FOV) et dans l'espace arrière (au-delà du FOV) sont différents. Nous supposons que le cadre de référence utilisée pour coder l'espace et la position des objets dans notre environnement est une cause possible de cette différence. Passant d'un cadre allocentrique à un cadre égocentrique en fonction de la région de l'espace à privilégier. Nous avons développé un protocole expérimental en laboratoire pour étudier cette différence plus en profondeur notamment par le biais de mesure cérébrale tel que les potentiels évoqués (EEG, NIRS) ou l'imagerie cérébrale (IRMf, PETscan).

De plus, s'il est possible de diriger l'attention des personnes au moyen d'information réflexive, l'on peut alors imaginer des systèmes de guidage de l'attention hors champ de vision (FOV). L'on pourrait alors utiliser des indices destinés à orienter l'attention dans le champ de regard des sujets (FOR). L'on pourrait ainsi aider les individus à se préparer à traiter une information qui se situe dans leur environnement actuel, mais qu'ils ne peuvent pas percevoir directement. Par exemple, l'on pourrait aider les automobilistes à privilégier l'information provenant d'un des deux rétroviseurs afin qu'il fasse attention lorsqu'il s'approche trop près d'un mur lors d'un créneau. L'on pourrait également guider les pilotes lors des vols en formation. Les vols en formation sont des situations complexes où les pilotes doivent coordonner les mouvements de leurs appareils afin de se positionner correctement les uns par rapport aux autres. Les constructeurs ont tout de suite compris l'intérêt des rétroviseurs dans ce genre de situation et certains avions destinés à ce type de manœuvre sont déjà équipés

de rétroviseur (IMAGE). L'on pourrait, à l'image de l'automobiliste, guider le pilote vers les informations importantes. En lui indiquant vers quelle région du ciel il doit orienter son attention. Notamment dans les situations d'urgence telles qu'une collision imminente avec un autre appareil détectable par un système de radar. En lui indiquant le rétroviseur qu'il devra privilégier, l'on peut espérer lui donner les quelques millisecondes qui peuvent faire la différence dans ces situations d'urgence. Les applications des résultats de ces expériences sont multiples même si de nombreuses expériences sont encore nécessaires pour déterminer les facteurs qui impactent l'orientation de l'attention dans la vie réelle. S'il apparait que l'on peut transférer les études effectuées en laboratoire et les théories qui en découlent pour des visées applicatives. D'autres recherches sont nécessaires pour déterminer les facteurs a manipulé et les indices a utilisé pour orienter l'attention de la manière la plus efficace possible en fonction des buts recherches (ex. : réponse rapide, réponse précise, réponse rapide et précise), des actions à effectuer (simple, complexe, fine, globale, etc.) et de la région de l'espace à privilégié (proximal, distal, frontal, dorsal, etc). De plus, il reste encore des défis techniques aux systèmes de monitoring et de guidage de l'attention en temps réel. Ici, les experts en sciences de l'ingénieur seront nos meilleures alliées.

4 Perspective Applicative

Dans cette thèse, nous avons utilisé une approche multidisciplinaire qui allie les connaissances acquises en sciences de la cognition et les nouvelles technologies utilisées en sciences de l'ingénieur afin d'étudier et manipuler les processus d'orientation de l'attention. De cette multidisciplinarité née une pluralité de points de vue, de regard sur ces recherches. L'expert en sciences cognitives y verra l'apport fondamental de telles recherches et s'intéressera au processus cognitifs mis en jeu dans nos expériences. L'expert en sciences de l'ingénieur aura un regard de concepteur, de développeur de solutions techniques. Il apprendra davantage sur les mécanismes de l'attention et pensera mieux les systèmes dédiés par exemple à la surveillance ou au monitoring. Mais cette thèse a des implications plus larges, comme toute recherche sur la cognition et le comportement humain. Ainsi, d'autres professions pourront s'y intéresser comme les ergonomes, les experts en facteur humain, en technologie cognitive ou cognitive, les informaticiens, les experts en eye-tracking et toutes les disciplines qui ont besoin de savoir sur la cognition humaine et qui utilisent des technologies numériques dans un objectif d'amélioration de la performance humaine.

Comme nous l'avons vue, l'attention, ou plutôt, devrais-je dire, les processus attentionnels sont des processus fondamentaux dans le traitement de l'information. L'attention sélective, en faisant le tri entre toutes les informations qui émanent de notre environnement, façonne notre perception consciente du monde. Chaque personne est différente et sélectionne

l'information à sa manière. S'il existe des patterns attentionnel commun à tous, probablement fruit de l'évolution et de nos apprentissages, nous sommes tous capables de sélectionner l'information dans notre environnement, selon nos propres attentes et nos préférences (orientation endogène). Ainsi, nous nous construisons une image du monde qui nous est propre selon notre propre système de sélection. Mais ces systèmes de sélection sont complexes et nombreux. Nous savons que plusieurs types de processus agissent de concert pour effectuer cette sélection (alerte, orientation, contrôle exécutif) et qu'ils ne sont pas toujours soumis à un contrôle volontaire (processus automatique et contrôlé). Mais nous savons mais aussi que nous sommes incapables de traiter en profondeur toutes les informations de notre environnement (capacités limitées) et nous sommes aveugles à bien des choses (cécité inattentionnelle). Prendre conscience des limites de notre attention et comprendre son fonctionnement, c'est nous libérer de ces limites. Même si, nous ne serons jamais capables de traiter plus d'informations que ce que notre système cognitif nous permet de traiter, nous pouvons choisir de mieux sélectionner l'information. Nous pouvons user de nos processus volontaires afin de guider notre attention dans la bonne direction. Et ceci dépasse le domaine des facteurs humains et de l'erreur humaine. Pour citer William James : « La faculté de ramener volontairement une attention vagabonde, encore et encore, est le véritable fondement du jugement, du caractère et de la volonté. Personne n'est maître de lui s'il n'en dispose pas. L'éducation qui pourrait améliorer cette faculté serait l'éducation par excellence. » (James, 2007.) Et heureusement pour nous, il n'y a pas d'âge pour apprendre.

Comme nous l'avons vu, la réalité virtuelle s'avère un outil extrêmement utilisé pour l'apprentissage et la formation 1.3.3. Étudier les processus attentionnels pour comprendre leur fonctionnement dans ce type d'environnement et développer des techniques de guidage afin de favoriser leur déploiement pourrait permettre de concevoir des environnements d'apprentissage et de formation performants. Ces dispositifs de formation aideraient les

apprenants à favoriser la prise d'information en les guidant vers les informations importantes, tout en veillant à ne pas les perturber avec un trop plein d'informations qu'il ne serait pas capable de traiter. S'il n'y a pas eu besoin d'attendre la réalité virtuelle pour faire ce constat. Il reste néanmoins que les études sur l'attention en réalité virtuelle ont fait l'objet de peu d'intérêt. Utiliser le paradigme de Posner dans cet objectif d'apprentissage en environnement immersif présente l'avantage de fournir une méthodologie et un vocabulaire communs. Les études effectuées via ce cadre expérimental pourront alors faire l'objet de répliques et permettront des comparaisons précises, basées sur des définitions communes. Il sera alors possible de concevoir des systèmes d'apprentissage et de formation les plus efficaces possible via un guidage attentionnel efficient basé sur les résultats d'un paradigme reconnu en sciences cognitives.

Au-delà de cet aspect éducatif, le guidage de l'attention d'un point de vue plus global est une arme efficace contre le manque d'attention et la surcharge cognitive. Rediriger l'attention d'une personne, c'est rediriger ces ressources cognitives vers le traitement d'informations qui nécessitent un traitement prioritaire durant l'activité en cours. Nombreuses sont les situations où notre environnement peut changer en un instant. Manquer ou traiter la mauvaise information peut alors conduire à des erreurs et des accidents. Combien de fois a-t-on entendu après un accident : "je ne vous avais pas vu". Combien d'informations manquées parce que nous étions concentrés sur autre chose ? Malheureusement, parfois, ce système d'alerte semble défaillant (tunnélisation). Quels sont les déterminants de ce dysfonctionnement ? Pourquoi ignore-t-on parfois des informations capitales ? Comment combler cette lacune ? Étudier l'orientation de l'attention dans ce genre de situation, en les reproduisant par exemple en réalité virtuelle, pourrait permettre de répondre à ces questions. Mais il est d'ores et déjà possible de maximiser la prise d'informations et d'améliorer les systèmes d'alarme utilisés dans la vie de tous les jours, en se basant sur les apports théoriques que fournissent

les études déjà effectuées sur l'orientation de l'attention. Le paradigme de Posner ayant une bonne validité écologique comme nous avons pu l'observer dans cette thèse. La dernière partie de cette thèse (4.2) propose une réflexion sur les applications possibles, de l'utilisation d'un paradigme de Posner écologique, pour l'amélioration et le développement des systèmes d'alarme, de guidage et d'apprentissage, mais aussi dans l'évaluation clinique des capacités visuospatiales. Nous nous baserons sur la littérature existante du paradigme de Posner et les théories associées ainsi que sur les expériences réalisées dans cette thèse. Nous essayerons de faire communiquer deux sciences : une science fondamentale experte de la cognition et du traitement de l'information et une science appliquée experte dans l'innovation et le développement des solutions technologiques de demain.

4.1 Synthèse globale des expériences réalisées

4.1.1 Expériences réalisées et facteurs manipulés

Dans cette thèse, nous avons utilisé le paradigme de Posner dans toutes nos expériences. Ce paradigme permet de déterminer l'efficacité d'une stimulation perceptive, appelé "indice", à attirer l'attention vers une certaine région de l'espace visuel. Nous avons utilisé des indices visuels et auditifs afin d'orienter l'attention de participants vers 4 localisations prédéfinies de l'espace visuel. Ces indices pouvaient attirer automatiquement l'attention en invoquant des processus endogènes hors du contrôle de l'individu, tel qu'un son spatialisé (en 3 dimensions) émis dans l'environnement ou la mise en évidence brève d'un objet par un changement de couleur. Il pouvait également fournir des informations symboliques et informatives d'une région de l'espace à prioriser. Et donc, nécessiter un déplacement volontaire de l'attention. Comme les flèches directionnelles et les instructions écrites ou vocales contenant des informations spatiales (haut, bas, gauche, droite, etc). Nous avons

également étudier l'effet de ces indices lorsqu'ils orientaient l'attention à travers un miroir afin d'orienter l'attention dans l'espace qui se situe derrière les sujets. L'utilisation de la réalité virtuelle et augmentée ainsi que d'expérience plus classique sur écran d'ordinateur ont permis l'utilisation de réponses motrices variées ; d'un simple appui touche à la prise d'objet réel et virtuel. La mise en commun des résultats de toutes ces expériences fournit un diaporama intéressant des processus d'orientation de l'attention tels qu'ils se déploient dans différentes situations proches de la vie quotidienne. S'ils ne peuvent fournir une réponse définitive et exhaustive des meilleures stimulations à utiliser pour orienter l'attention des individus en environnement réel et virtuel. La diversité des variables manipulées dans nos expériences est l'occasion de réfléchir au déterminant d'un guidage de l'attention efficient. Mais aussi, à ce que les sciences cognitives et en particulier le paradigme de Posner nous apprennent dans l'amélioration du traitement de l'information pour toutes les situations à changement environnemental rapide qui nécessite un déploiement optimal de l'attention. Dans ces situations, une grande quantité d'information peut être reçue dans un court laps de temps et un traitement rapide et précis est nécessaire afin d'agir rapidement et efficacement. On peut penser notamment à la conduite automobile, au pilotage, à la chirurgie, au sport et à toutes les situations d'urgences où l'on doit agir efficacement et rapidement.

Dans les différentes modifications du Paradigme de Posner que nous avons utilisées dans nos expériences, nous avons manipulé 5 facteurs intrasujets (Tableau 4.1):

1. La validité de l'indice : Valide, Invalide, Neutre

Qui correspond à l'information fournie par l'indice sur l'emplacement de la cible. Valide, l'information est correcte. L'indice indique l'endroit exact d'apparition de la cible à traiter. Il oriente l'attention au bon endroit. Invalide, l'information sur l'emplacement de la cible est erronée. L'indice oriente l'attention vers une région de l'espace où la cible n'apparaît pas. Neutre : l'indice ne fournit aucune information

Table 4.1

Tableaux des variables intrasujets manipulés dans cette thèse

	posnerVR	posnerAR	posnerGame	posner360-1	posner360-2	posner360-3
Validité	Valide Invalide	Valide Invalide	Valide, Invalide, Neutre, No Cue	Valide, Invalide	Valide, Invalide, Neutre	Valide, Invalide
Modalité	Visuelle, Auditif	Visuelle	Visuelle	Visuelle	Visuelle, Auditif	Visuelle, Auditif
Prédictivité	80%	80%	50%, 80%	80%	80%	50%, 100%
Type	Endogène Exogène	Endogène Exogène	Endogène Exogène	Endogène	Endogène	Endogène
Localisation	Devant	Devant	Devant	Devant, Derrière	Devant, Derrière	Devant, Derrière

fiable sur la localisation d'apparition de la cible. Il n'oriente pas l'attention qui est diffuse. L'efficacité d'un indice est déterminée par la différence de temps de réponse entre la condition de validité et les conditions d'invalidité ou de neutralité. La magnitude de cette différence ou *cueing effect* est une estimation de l'efficacité de l'indice à orienter l'attention spatiale des sujets. La balance coût/bénéfice ($TR_{valide} < TR_{neutre} = \text{bénéfice}$; $TR_{neutre} < TR_{invalide} = \text{coût}$) pouvant être inégale ou inversée si l'ISI (intervalle de temps entre l'indice et la cible) n'est pas adapté, par exemple, au type d'indice (endogène/exogène) et à la tâche effectuée (détection, discrimination, Go-NoGo, Flankers, etc).

2. La modalité de l'indice : Visuelle, Auditive

La modalité de l'indice est le canal sensoriel utilisé pour fournir l'information sur la localisation de la cible. Si l'indice et la cible sont fournis sur le même canal sensoriel, l'orientation de l'attention est intramodale, à l'intérieur d'une modalité sensorielle.

Si l'indice et la cible sont fournis sur des canaux sensoriels différents, par exemple un indice auditif et une cible visuelle, l'orientation est dans ce cas cross-modale. Il y a un changement de modalité sensorielle entre le traitement de l'indice et de la cible.

3. La prédictivité de l'indice : 50%, 80%, 100%

La prédictivité de l'indice est sa capacité à prédire la position de la cible au fil des essais expérimentaux. Si un indice est prédictif, il sera valide dans la majorité des essais d'un bloc expérimental. Il indiquera ainsi avec une forte probabilité l'endroit d'apparition de la cible. Les sujets trouveront un intérêt à utiliser cet indice pour orienter leur attention. Si un indice est non prédictif, il sera aléatoirement valide et invalide dans un bloc expérimental. Les sujets finiront par ignorer l'indice qui perdra sa capacité à orienter l'attention sauf s'il s'agit d'un indice qui a des composantes exogènes.

4. Le type d'orientation induite par l'indice : Endogène, Exogène

Le type d'orientation se réfère au type d'orientation impliqué dans le traitement de l'indice pour sélectionner la région de l'espace à privilégier. Cette sélection peut se faire par des processus automatiques en dehors du contrôle de l'individu (bottom-up) ou être déclenchée volontairement par l'individu lui-même (top-down). La saillance d'un stimulus est sa capacité à orienter l'attention de manière automatique, elle est inhérente au stimulus utilisé qui se différencie de son environnement par des caractéristiques physiques. Une différence de couleur, de luminosité, de vitesse, de forme ou toute autre différence qui fait que le stimulus est remarquable dans son environnement est susceptible de provoquer une orientation exogène de l'attention. Tout autre stimulus non saillant aura besoin d'être porteur de sens pour l'individu afin qu'il oriente son attention. Il devra être indicatif d'une région particulière de l'espace et avoir une

prédictivité suffisante pour être pertinente et aider à la réalisation de l'activité en cours.

5. La localisation de la cible : Droite, Gauche, Devant, Derrière

La localisation de la cible dans l'espace se réfère dans cette thèse à la position relative de la cible par rapport à l'individu. Est-ce que la cible se situe sur sa gauche ou sur sa droite comme classiquement, mais aussi devant ou derrière en considérant le champ de regard (FOR) et non plus seulement le champ de vision (FOV). Plus précisément pour le moment cette distinction est seulement applicable à une information projetée devant le sujet via un dispositif de réflexion par miroir et peut-être par association d'information relative à la position d'un objet dans l'espace comme un plan ou une carte interactive.

4.1.2 Paramètres utilisés

Certains paramètres ont différé entre les expériences et seront définis ici en tant que facteur inter-expérience. Ces facteurs n'ont pas fait l'objet d'hypothèses, ni d'analyses approfondies et ne sont mentionnés ici qu'à titre indicatif.

1. La Durée de fixation : 1500 - 3000 ms

La durée de fixation correspond à la durée d'affichage du point de fixation au début d'un essai avant l'apparition de la cible.

2. La durée de présentation de l'indice : 200 - 300 ms

La durée de présentation de l'indice correspond au temps d'affichage de l'indice. Avec l'ISI (intervalle inter stimulus), il forme le SOA.

3. L'ISI et le SOA : 300 ms (SOA 500 - 600 ms)

Le SOA ou stimulus onset asynchrone correspond à l'intervalle de temps entre le

début d'apparition de l'indice et le début d'apparition de la cible. Dans un objectif de comparaison des effets de l'orientation endogène et exogène dans des situations expérimentales comparables, nous avons choisi de ne pas manipuler le SOA dans cette thèse. Dans un objectif d'amélioration de la performance, il serait intéressant d'étudier les effets des indices en accord avec leur décours temporel. C'est-à-dire que le SOA devrait être adaptée au type d'indice et à la tâche à effectuer dans un objectif de maximisation de la performance. Par exemple, le SOA impacte l'effet de validité (cueing effect) en fonction du type d'indice. Ainsi, les effets les plus forts sont observés à des SOA courts pour les indices exogènes et à des SOA longs pour les indices endogènes (Chica et al., 2014). Manipulées ces variables en facteurs intrasujets semble indispensable dans une perspective d'étude de l'orientation de l'attention pour une visée applicative. De plus, le SOA devrait être adapté au type d'indice, à la modalité et à la tâche à effectuer. Néanmoins, les contraintes temporelles dues à la complexité de nos designs expérimentaux, aux actions complexes que l'individu doit effectuer dans l'environnement et l'utilisation de la réalité virtuelle ne nous ont pas permis de le manipuler dans cette thèse. De futures études pourraient étudier l'influence du SOA en environnement écologique en fonction des indices utilisés et de la cible à traiter.

4. La durée de présentation de la cible : 300ms - TR dépendent

La durée de présentation de la cible correspond au temps d'affichage de la cible. Il peut être bref ou dépendre de la réponse du sujet. Cette durée peut influencer l'effet d'indication (Chica et al., 2014).

Toutes ces variables peuvent impacter la facilitation habituellement observée pour les indices valides, mais aussi l'IOR (inhibition de retour). Dans un objectif applicatif, ces variables doivent être adaptées en fonction du type d'indice utilisé (endogène/exogène), de la

tâche effectuée (détection, discrimination, Go-Nogo) et des des buts recherchés (facilitation, inhibition) ; (pour une review, voir : Chica et al., 2014).

Table 4.2

Tableaux des variables inter expériences

Paramètre	Durée Fixation (ms)	Durée Cue (ms)	SOA (ms)	Durée cible (ms)
posnerVR	3000	300	300	300
posnerAR	1500	200	300	200
posnerGame	1500 - 2500	100	400 (endo,exo) ; 800 (exo)	500
posner360 ₁	1500	300	300	Jusqu' destruction
posner360 ₂	1500	300	300	Jusqu' destruction
posner360 ₃	1500	300	300	220 color

4.1.3 Synthèse des résultats

4.2 Ouverture et Application

Nous avons vu tout au long de cette thèse et des expériences réalisées plusieurs perspectives d'application possible. Les études sur l'orientation de l'attention peuvent en effet s'appliquer dans de nombreux domaines. Le premier a fait l'objet de nombreuses recherches en ergonomie notamment via les recherches sur l'audition. Il s'agit des systèmes d'alarme destinés à alerter les individus d'un danger imminent, comme peuvent être les alarmes incendie ou les alarmes d'urgence utilisée dans les situations où les individus doivent être attentifs et vigilants pour garantir leur sécurité et celle d'autrui. Le deuxième domaine d'application est proche du premier et s'intéresse au déplacement de l'attention au sein d'une

Table 4.3

Effet de validité (cueing effect) en fonction des expériences réalisées, des indices utilisés et des mesures effectuées.

Cueing Effect	Visuelle Endogène	Visuelle Exogène	Auditif Endogène	Auditif Exogène
posnerVR	IA : 7ms LD : 15ms	IA : 37ms* LD : 56ms*	IA : 47ms* LD : 140ms*	IA : 3ms LD : 29ms
posnerAR	68ms*	85ms*	X	X
débris360	GI : 79ms* TL : 98ms*	X	GI : 25ms* TL : 47ms*	X
vaisseau360	Devant : 62ms Derrière : 44ms	X	Devant : 46ms Derrière : 50ms	X

IA = initiation de l'action, PC = prise du couvercle, IR = initiation du regard, VC = verrouillage de la cible. * = différence significative. X = variable non manipulée dans l'expérience

activité qui demande une bonne concentration et des capacités de réaction et de décision optimale au sein d'environnements chargés en information, souvent difficiles à distinguer les uns des autres par des caractéristiques physiques. Par exemple, les cockpits d'avions et les blocs opératoires composés de nombreux outils et instruments aux fonctions bien précises et distinctes qu'il ne faut pas confondre les uns des autres. Mais aussi les compétitions sportives qui demandent un traitement optimal de l'information pour de bonnes performances. Le football, le rugby, le basket, le tennis, le volleyball, le handball, la course automobile sont autant d'activités sportives qui nécessitent de bonnes capacités d'orientation attentionnelle afin de traiter efficacement et rapidement les déplacements du ballon, de la balle, des joueurs et des coureurs pour prendre les bonnes décisions et utiliser les actions les plus appropriées pour marquer des points. Nous discuterons d'application de formation réalisable à moindre coût via la réalité virtuelle, en particulier pour l'apprentissage procédural. Enfin, le dernier domaine et celui de l'application clinique du paradigme de Posner, notamment

dans l'évaluation des capacités d'orientation visuo spatiale. Par exemple, chez les malades atteints de la maladie de Parkinson ou chez les cérébrolésés présentant une héli-négligance spatiale unilatérale.

Dans la fin de cette thèse, nous allons présenter brièvement ces domaines d'applications et essayerons de mettre en lien les connaissances sur l'orientation de l'attention et les résultats des expériences effectuées via le paradigme de Posner avec ces domaines d'applications. Nous verrons quelles caractéristiques des indices doivent être prises en compte en fonction des perspectives applicatives recherchées. Nous verrons également des possibilités de recherche à effectuer et les problématiques qu'il reste encore à explorer.

4.2.1 Applications pour les systèmes d'alarme

Lorsque l'on pense orientation de l'attention, le premier exemple souvent donné et celui d'une alarme ou d'un téléphone qui sonne. Cette orientation exogène est connue de tous, lorsqu'une alarme retentit nous sommes interrompus pendant un court instant dans notre activité, qu'elle soit physique ou mentale, et nous portons notre attention vers le signal perçu et nous préparons à l'action. Cette caractéristique primitive de l'attention est une des armes actuellement les plus utilisées contre la distraction et le vagabondage, juger si dangereux dans un monde en perpétuel changement. Mais elle est aussi source de distraction. De nos jours, on peut reprocher à nos compagnons technologiques d'être un peu trop bruyants, trop bavards, trop gourmands en attention. Si bien que notre attention est constamment tiraillée d'une information à une autre. Notification d'un réseau social, réception d'un e-mail, appel téléphonique sont autant de stimuli qui attirent notre attention, souvent automatiquement, dans un monde parfois déjà très demandeur en attention. Travail, école, vie de famille, ces appels à l'attention peuvent perturber nos activités quotidiennes. Ces appels incessants à orienter notre attention dans une direction puis une autre façonnent notre manière de

sélectionner l'information et de percevoir le monde. Il est aujourd'hui plus que jamais important de considérer la manière dont on manipule l'attention des gens et dans quel objectif. Il est possible que la sur-stimulation permanente de notre système attentionnel crée de nouveaux schémas de sélection potentiellement délétères à l'adaptation de l'individu. En effet, imaginons que demain, vous trouviez une application pour votre téléphone qui change la sonnerie de celui-ci par des bruits de klaxon. Au-delà de l'aspect extrêmement agaçant que pourrait avoir une telle sonnerie, si vous vous y habituez, vous finirez petit à petit par considérer que le son du klaxon est un son banal qui ne mérite pas toujours votre attention. Ainsi, un jour sur l'autoroute, un automobiliste un peu téméraire essaiera-t-il de vous prévenir de son arrivée imminente avec un coup de klaxon que vous confondrez avec votre téléphone. Si vous allez très probablement comprendre qu'il s'agit d'un véritable klaxon en vous basant sur d'autres indices, vous aurez peut-être déjà perdu trop de temps pour réagir efficacement et éviter une collision. Derrière cet exemple caricatural, se cache une problématique importante. Quelle est l'effet à long terme de toutes ces stimulations utilisées par les technologies d'aujourd'hui sur notre orientation spatiale ?

Ceci est particulièrement important pour les individus qui exercent des métiers où les alarmes ne sont pas de simples notifications sans réelle importance, mais des informations capitales qu'il faut prendre en compte impérativement pour le bon déroulement de procédures de sécurité ou de secours. C'est le cas, par exemple, lors des phases d'atterrissages pour prévenir les pilotes de l'approche du sol. Mais aussi pour les alarmes dans les navettes et stations spatiales destinées à indiquer un problème technique. Ou encore sur les panneaux de signalisation utilisés sur les routes pour indiquer un danger proche. Comprendre les déplacements de l'attention dans ce genre de situation est un moyen efficace de concevoir des alarmes efficaces, adaptées à l'objectif en cours, en prenant soin de considérer le type de processus mis en jeu (endogène, exogène), l'intervalle de temps entre l'indice et la cible et

la performance souhaités (rapidité, précision, etc). Ces variables impactent toutes l'efficacité de l'alarme à orienter l'attention. Il est à noter que la plupart des alarmes utilisées sont non informatives sur la localisation de la cible dans l'espace et se résument souvent à un signal sonore. Elles mettent donc en jeu le système d'alerte de l'individu (1er réseau d'attention), mais n'orientent pas son attention dans l'espace, hormis à la position du dispositif sonore ou visuelle utilisée. Les alarmes qui fournissent des informations spatialement pertinentes pourraient être plus efficaces. En effet, un indice non informatif correspond à un essai neutre dans un paradigme de Posner; or on sait que les indices valides, qui fournissent des informations spatialement prédictives sur la région de l'espace qui va devoir être privilégié permettent de faciliter le traitement de l'information par rapport à ces essais neutres. Le design et la position des alarmes et des instructions fournies à l'individu devraient être pensés au regard des théories de Posner sur l'orientation de l'attention. C'est-à-dire qu'il faut considérer par exemple la position des alarmes sonores et visuelles dans les cockpits ou fournir des instructions verbales qui indiquent la localisation de l'information à traiter dans l'environnement du sujet lorsque cela est possible.

Le paradigme de Posner et les recherches effectuées en laboratoire suggèrent qu'il faut privilégier les indices exogènes si l'objectif est d'avoir un déploiement attentionnel rapide. Tandis qu'une orientation endogène sera plus adaptée pour maintenir la capture attentionnelle dans le temps, mais nécessitera un certain temps avant de se déployer. Cependant, le paradigme de Posner ayant été très peu étudié en dehors du laboratoire, on ne sait pas à quel point on peut appliquer ces résultats à des situations qui dépassent le traitement de quelques informations sur un écran et une action motrice simple. On sait maintenant que le paradigme de Posner peut être utilisé en environnement écologique et plus particulièrement en réalité virtuelle. On peut alors concevoir différents scénarios à l'exemple de ceux mentionnés ci-dessus, afin de tester et d'identifier les variables à manipuler pour capturer efficacement

l'attention dans ce genre de situation. On peut également tester l'habituation à certain indice et voir si la nouveauté s'avère plus intéressante pour orienter l'attention, ou si une alarme toujours identique permet une meilleure orientation en fonction des situations. Par exemple, il serait possible de développer un programme qui reproduit une situation de déplacement sur un axe routier et tester l'impact de différents panneaux de signalisation sur le comportement des automobilistes en fonction du type d'indice, de la modalité, etc. On pourrait également s'intéresser à la localisation dans l'espace des informations à traiter au regard de la différence potentielle de traitement entre l'espace avant et arrière, notamment lors de l'utilisation de rétroviseur à l'image des études de Ho and Spence (2005) sur l'attention cross-modale. Ou bien encore, trouver une alarme efficace contre la tunnélisation en déterminant les facteurs qui amènent à ce phénomène et les potentiels techniques pour y remédier. On sait par exemple que notre propre prénom ou visage a des effets particuliers sur notre attention et active des processus cérébraux uniques (Carmody & Lewis, 2006; Ocampo & Kahan, 2016; Tacikowski & Nowicka, 2010) même pour des personnes en état végétatif (Staffen, Kronbichler, Aichhorn, Mair, & Ladurner, 2006). Cependant, les déterminants de cette facilitation ne sont pas clairs (Bundesen, Kyllingsbaek, Houmann, & Jensen, 1997; Kawahara & Yamada, 2004). Étudier ces effets en environnement immersif et écologique pourrait nous en apprendre davantage sur la question et s'avérer une alternative intéressante lorsque d'autres types de stimulation ont échoué à attirer l'attention.

Vous l'aurez compris, dans le développement de système d'alarme et de prévention le paradigme de Posner permet l'exploration de nombreux facteurs, base potentielle d'une orientation efficace. Les études sur l'attention pour éviter l'erreur humaine n'ont pas attendu cette thèse pour exister et l'on trouve une littérature florissante sur l'attention notamment dans le domaine du transport et de l'automobile (Hooey, 1996; Lemercier & Cellier, 2008; Liu, 2003; Mihal & Barrett, 1976; Noy, 1990; Strayer et al., 2015) ainsi

que dans l'aéronautique (Albery, 2007; Allsop & Gray, 2014; Debroise, 2010; Feyereisen & Cundiff, 2001; Lewitowicz, Szelmanowski, Pazur, Michalak, & Janik, 2017). Dans l'automobile, les déficits du contrôle attentionnel (inattention, distraction) sont la principale source d'accident (Hendricks, Fell, & Freedman, 1999; J. D. Lee & Strayer, 2004; Lemercier & Cellier, 2008. En effet, lorsque nous sommes en voiture, nous sommes confrontés à un grand nombre de stimuli, internes ou externes, qui vont influencer notre conduite. Les stimuli exogènes rencontrés pourront entraîner un comportement approprié ou distraire l'individu. Par exemple, le passage du feu vert à l'orange permet au conducteur d'anticiper l'arrêt de son véhicule, tandis que la sonnerie de son téléphone orientera son attention vers une information qui dégradera sa tâche principale (Lemercier & Cellier, 2008). Des stimuli internes responsables d'une orientation endogène peuvent également dégrader la conduite des automobilistes comme les pensées sur les activités à faire dans la journée. La capture exogène fait référence à ce que l'on appelle communément distraction tandis que la capture attentionnelle endogène traduit plutôt les phénomènes d'inattention. Cependant, la difficulté à étudier l'attention en situation réelle et dynamique est difficile, le fait est que peu de recherches ont étudié la question au regard du paradigme de Posner. Nous avons vu dans cette thèse que ce paradigme était transférable en environnement écologique en utilisant la réalité virtuelle et la réalité augmentée durant la réalisation d'actions sur des objets familiers, réels et virtuels. Ces environnements naturels et pseudo-naturels qui permettent d'explorer le déplacement de l'attention dans la totalité de l'environnement d'un individu, lorsqu'il effectue des actions et des interactions proches de ce qu'il peut expérimenter dans ses pratiques quotidiennes, sont une porte d'entrée intéressante au développement et au test de nombreux systèmes d'alarme et de prévention. C'est aussi une opportunité d'étudier les déplacements de l'attention via un paradigme connu et reconnu en sciences cognitives notamment dans les situations où l'orientation de l'attention est une composante principale

au bon déroulement d'une activité comme dans l'automobile et l'aéronautique.

4.2.2 Applications pour le guidage de l'attention et l'apprentissage

Si une alarme oriente l'attention d'une personne pendant un court instant afin de rediriger les ressources attentionnelles des individus vers une tâche qui demande la priorité sur l'activité en cours. L'on peut être amené à vouloir guider l'attention d'une personne tout au long d'une tâche. Par exemple, pour aider les agents de maintenances à faire les vérifications de sécurité nécessaire pour que l'appareil qu'il vérifie puisse continuer sa fonction. Dans ce cas, l'on cherchera à orienter l'attention dans l'espace et dans le temps. Il sera alors nécessaire de s'intéresser aux effets séquentiels et interférences possibles qu'il peut exister entre les indices. Si l'on souhaite, par exemple, combiner plusieurs indices pour diriger l'agent de maintenance vers une région éloignée de l'espace visuel actuellement perçu. En d'autres termes, est-il préférable d'orienter l'attention de manière endogène puis exogène ? Faut-il utiliser une information sonore derrière lui pour qu'il se retourne et ensuite rendre saillante l'information à vérifier ? Est-il préférable de lui montrer sur un plan de l'appareil via une tablette numérique par exemple ? Ou de lui montrer par réflexion miroir ? Toutes ces questions sont autant de pistes à explorer qui trouveront un écho particulier dans l'apprentissage de procédure.

Une procédure est définie comme une suite d'action à réaliser dans un ordre précis. Nous possédons tous une mémoire procédurale qui est une mémoire motrice qui nous permet d'effectuer des enchaînements d'actions de manière automatique. Les informations stockées dans cette mémoire procédurale sont le résultat de la répétition d'une même action dans notre environnement. Lorsque l'on souhaite entreprendre une action dans notre environnement, nous devons parvenir à identifier l'objet concerné par l'action à réaliser. La recherche de

cet objet peut s'avérer difficile. Notamment, s'il se trouve au milieu d'un grand nombre de destructeurs. La recherche est encore plus difficile si ces destructeurs partagent des propriétés communes (couleur, forme, orientation, etc.) avec l'objet à sélectionner (A. Treisman, 1991; A. M. Treisman & Gelade, 1980). L'individu devra alors effectuer un balayage de l'ensemble de la scène pour identifier l'objet cible, un processus qui prend du temps et qui augmente la charge cognitive. Ainsi, l'orientation de l'attention peut permettre à l'individu de trouver l'objet cible beaucoup plus rapidement et de réduire le coût de traitement lié à la recherche de l'objet. De plus, l'orientation de l'attention peut également faciliter le processus d'indexation, c'est-à-dire la correspondance entre le terme utilisé dans les instructions et l'objet auquel il fait référence (Hoareau, 2016). Nous avons vu que la réalité virtuelle permettait de développer des programmes de formation répétable un grand nombre de fois. Nous avons également vu qu'il était possible de transférer des schèmes d'action acquis en réalité virtuelle vers la vie réelle. Ainsi, il est possible de construire des programmes d'apprentissage de procédure en réalité virtuelle efficient. Aujourd'hui encore aucune étude ne semble avoir utilisé le paradigme de Posner dans cet objectif d'apprentissage. Mais de nombreuses études existent cependant sur le guidage de l'attention pour favoriser l'apprentissage qui montre que c'est une composante principale pour un apprentissage efficace. Le paradigme de Posner pourrait permettre de déterminer le type de guidage le plus efficient à utiliser et les facteurs à considérer dans cet objectif.

Le type d'indice est sans doute le facteur le plus important pour une orientation optimale. Il a déjà été observé que l'orientation de l'attention permettait d'améliorer l'apprentissage, notamment dans le domaine de l'apprentissage multimédia. Beaucoup se sont concentrés sur des indices exogènes et notamment sur la notion de saillance. Ces études ont montré l'importance de considérer l'importance des capacités visuospatiale et de l'indication des éléments à considérer durant la compréhension et l'apprentissage d'animations multimédia

(Boucheix & Guignard, 2005; Boucheix & Lowe, 2010; De Koning, Tabbers, Rikers, & Paas, 2009; Erhel & Jamet, 2013; Hegarty & Steinhoff, 1997; Kalyuga, Chandler, & Sweller, 1999; Mautone & Mayer, 2001; Mayer, 2010; Tabbers, Martens, & Van Merriënboer, 2004; Xie, Mayer, Wang, & Zhou, 2019). Par exemple, De Koning, Tabbers, Rikers, & Paas, 2007 ont montré que l'utilisation d'indice visuelle pendant le visionnage d'animation du système cardiovasculaire permettait d'améliorer la compréhension et le transfert de l'information et ceci même pour l'information qui n'a pas été indiquée. Les auteurs concluent que l'indigage (L'orientation de l'attention) peut être utilisé pour améliorer l'apprentissage des animations. Cependant, d'autres études suggèrent que l'orientation de l'attention sur les éléments pertinents de la scène ne garantit pas que la structure causale sous-jacente nécessaire à l'apprentissage soit extraite avec précision (De Koning, Tabbers, Rikers, & Paas, 2010; Kriz & Hegarty, 2007; pour une vue d'ensemble, voir De Koning et al., 2009). D'autres auteurs ont utilisé des indices endogènes pour guider l'attention des apprenants. Ainsi, Pederson & Guion-Anderson, 2010 ont montré que l'utilisation d'une orientation endogène pouvait faciliter l'apprentissage phonétique. Logan, Taylor, & Etherton, 1996; Posner & Petersen, 1990; Posner et al., 1980 avaient déjà montré que l'orientation endogène de l'attention permettait d'améliorer la probabilité de détection des informations pertinentes, le traitement en mémoire à court terme et le transfert en mémoire à long terme.

Glaser & Schwan, 2015 ont étudié l'effet de texte parlé sur l'apprentissage d'images multimédia. Leurs résultats montrent que les images qui étaient accompagnées d'un texte audio dans lequel les différents éléments de l'image étaient nommés étaient mieux apprises (rappel libre, choix multiples et reconnaissance visuelle) que les images ou les différents éléments n'étaient pas nommés dans le texte audio. Dans une deuxième expérience, via l'utilisation d'un eye tracking, ils ont pu démontrer que cette amélioration de la performance était due à un déplacement de l'attention plus avantageux lors de l'utilisation d'indice verbal

que sans utilisation d'indice verbal. En outre, les temps de fixations des participants étaient plus longs sur les stimuli pertinents référencés que sur les stimuli non référencés verbalement. Cette étude nous montre qu'un guidage audio endogène de l'attention permet d'améliorer les performances d'apprentissage d'images multimédia. Néanmoins, dans les études que nous venons de citer, les indices d'orientation utilisée ne sont pas à proprement parler et au regard des théories de Michael Posner des indices spatiaux. En effet, ils orientent essentiellement les buts de la personne par rapport à la tâche prescrite (prend le flacon, concentre-toi sur les voyelles, focalisez-vous sur la vitesse, déterminez le sens de rotation, etc.). Dans ces études, les auteurs ne guident donc pas l'orientation attentionnelle visuelle de la personne en leur indiquant l'emplacement exact d'apparition de telle ou tels objets. Mais plutôt une orientation focalisée sur les buts de la tâche (donc plutôt sur le contrôle exécutif). Ce type d'indice nécessite déjà de la part de l'apprenant, une certaine connaissance du système pour être efficace.

Comme nous l'avons vu, les deux types d'indices (exogène/endogène) semblent favoriser les performances et l'apprentissage. Même si certaines précautions doivent être prises concernant la généralisation de ces résultats. En effet, certaines études montrent des lacunes au de l'utilisation du guidage de l'attention au niveau de la compréhension et du transfert d'apprentissage (De Koning et al., 2010; De Schotten et al., 2011; Erhel & Jamet, 2013; Huk, Steinke, & Floto, 2010; Jamet, Gavota, & Quaireau, 2008; Kühl, Scheiter, & Gerjets, 2012; L. Lin & Atkinson, 2011; Tabbers et al., 2004). L'absence d'effets d'un indice visuelle sur la compréhension a fait l'objet d'une analyse approfondie dans deux études récentes (De Koning et al., 2009, 2010). Une explication avancée par ces auteurs est que la nature des indices utilisés peut déterminer quels types de processus cognitifs sont facilités. De plus, dans ces études il apparaît que les effets dépendent de la complexité du support multimédia et de sa dynamique (image statique/animation), mais également des modalités sensorielles utilisées.

En effet, il a été démontré que l'utilisation combinée de l'orientation attentionnelle visuelle et d'instruction verbale permettrait de meilleurs bénéfices (p. ex. Mousavi, Low, & Sweller, 1995), mais également d'améliorer les performances et de diminuer la charge cognitive (Boucheix & Guignard, 2005; Jeung, Chandler, & Sweller, 1997; Mayer & Anderson, 1991). En outre, dans la totalité de ces études basées sur l'apprentissage multimédia l'évaluation de l'apprentissage est faite sur des connaissances déclaratives (conceptuel) et non sur des connaissances procédurales.

Enfin, il semblerait que peu d'étude à ce jour ait tenté de déterminer quel type d'indice était le plus à même de favoriser l'apprentissage de l'apprenant. Pourtant, comme nous l'avons vu dans l'introduction de cette thèse (1.2.3.2), ces deux types d'indices entraînent des traitements différents (Top-Down/Bottom-Up) et se distinguent sur le temps de course, leur maintien à long terme, etc. Parmi les quelques études qui ont tenté une comparaison de ces deux types d'indices, nous pouvons citer : De Koning et al., 2007, 2010; Kriz & Hegarty, 2007, qui ont montré que l'utilisation de flèche par exemple, manquait de précision pour orienter efficacement l'attention et Boucheix & Lowe, 2010 qui ont également montré que l'utilisation de flèche était moins efficace que l'utilisation d'indice coloré.

Aujourd'hui encore, aucune étude ne semble avoir explicitement comparé l'influence de chaque type d'indice (exogène ou endogène) au regard du paradigme de Posner, dans l'amélioration des apprentissages. Notamment dans sa version couverte, les études sur le sujet étant souvent effectuée par suivi oculaire des apprenants. Pourtant, l'orientation endogène étant un processus de haut niveau, qui demande d'engager des ressources attentionnelles dans la tâche. On peut s'attendre à ce que l'utilisation de l'orientation attentionnelle endogène soit préférable à l'orientation exogène. De plus, comme nous l'avons vu dans le chapitre (1.2.3.2), le temps de course de l'orientation endogène est plus important que celui de l'orientation exogène permettant un maintien du traitement de l'information dans

un intervalle temporel plus long. R. K. Lowe, 1999 avait déjà démontré que les novices avaient des difficultés d'identification et de traitement séquentiel (subsequent processing) des informations pertinentes dans les animations, car leur attention est souvent attirée par des caractéristiques superficielles comme la luminance, les couleurs et les mouvements rapides qui ne sont pas nécessairement pertinentes pour comprendre la contenue. L'utilisation d'indice endogène pourrait pallier cet effet.

Enfin, nous pensons que les indices endogènes peuvent permettre de meilleurs bénéfices en situation réelle, que les indices exogènes. En effet, l'un des principaux désavantages de l'utilisation d'indice exogène, surtout lors dans des environnements dynamiques, est qu'elle peut entrer en concurrence avec d'autre indice exogène liée à la situation réelle. Aujourd'hui encore, on ignore toutes les caractéristiques qui font qu'un stimulus va attirer automatiquement notre attention. L'utilisation d'indice visuel endogène pourrait de ce fait présenter un avantage majeur. R. Lowe & Boucheix, 2011 ont commencé à émettre quelque réticence quant à l'utilisation d'indice visuel pour l'apprentissage. En effet, en étudiant le temps de fixation oculaire des participants, ils ont constaté que certains indices étaient totalement ignorés, car la personne focalisait son attention (volontairement cette fois-ci) sur un autre endroit de l'animation. Les auteurs expliquent que, si le moment et la présentation de l'indice sont bien adaptés à l'activité de traitement en cours, il y a facilitation de l'apprentissage. Cependant, si un indice est administré lorsque l'apprenant se trouve à un stade du traitement de l'information où la cible visée est considérée comme non pertinente à cette étape du cycle de traitement. Bien que l'apprenant voit l'indice, les considérations (TopDown/descendant/endogène) l'emportent sur l'influence (Bottom-up/ascendant/exogène) et l'indice est ignoré. L'utilisation d'un guidage attentionnel endogène pourrait donc être à privilégier pour l'apprentissage.

Pour guider spatialement l'orientation endogène des participants, il est possible, par

exemple, d'utiliser un quadrillage visuel avec des zones spécifiques de la scène pouvant servir au participant pour diriger son attention de manière volontaire. Il s'agirait en quelque sorte d'un système de repérage, non pas par illumination ou changement de couleur, mais à la manière d'un graphique en utilisant des échelles et un quadrillage qui simplifie la fenêtre visuelle de l'utilisateur et lui permet de se guider de manière volontaire lorsqu'une instruction lui dira, par exemple : l'arrêt des moteurs s'effectue en zone 2 B. On pourrait également utiliser des processus de discrimination, impliquant l'orientation et l'inhibition. Par exemple, en lui demandant de se concentrer sur les indices rouges et pas sur les verts. En effet, souvent les indices utilisés pour guider les apprenants consistent en l'application d'une couleur à la zone d'intérêt (orientation exogène). En gardant ce principe et en utilisant une couleur supplémentaire non pertinente, l'on pourrait indiquer à la personne que l'information actuellement traitée doit être ignorée. On "oblige" ainsi la personne, par un changement de couleur porteur de sens, à utiliser une orientation endogène. L'on utilise donc plus simplement une seule couleur comme habituellement qui provoque une orientation exogène, mais deux couleurs aux informations bien distinctes, l'une a facilité, l'autre à ignorer qui peut s'avérer plus avantageux dans un objectif d'apprentissage. En d'autres termes, en donnant une signification à la couleur pour qu'un processus top Down soit impliqué dans le traitement de l'information l'on pourrait éventuellement favoriser l'apprentissage. De futures études pourraient tester ces différentes hypothèses.

4.2.3 Applications en clinique et évaluation neuropsychologique

Faire gagner en validité écologique les paradigmes expérimentaux, c'est aussi les rendre plus engageants pour les participants. En effet, lorsque l'on veut augmenter la validité écologique d'un paradigme expérimental, nous devons l'adapter à des situations que les individus peuvent rencontrer au quotidien. Les objets perçus et manipulés, ainsi que les

interactions, doivent être au plus proches de ce que les gens ont déjà rencontré au quotidien. Ainsi, les participants à ce genre d'étude sont souvent plus motivés, car la tâche peut leur paraître moins abstraite qu'un paradigme classique réduit à l'utilisation de quelque symbole qui apparaît et disparaît sur un écran. Si cette réduction permet d'isoler précisément les processus cognitifs que l'on cherche à étudier, elle occulte la dynamique complexe qui existe lors de la sollicitation de ces processus dans nos activités du quotidien. Ainsi, elle n'est pas toujours représentative du fonctionnement de ces processus dans la vie réelle.

Utiliser un paradigme de Posner en version écologique permet donc d'atteindre un public pas toujours très motivé pour des passations expérimentales, notamment dans le domaine de la prise en charge de patients. Ces patients sont souvent confrontés à des batteries de tests neuropsychologiques qu'ils peuvent juger longues, peu engageantes et assez mystérieuses. Comme nous l'avons vu dans l'expérience intitulée "The Posner Game" qui est une expérience sur ordinateur de bureau classique, mais qui gagne en validité écologique, ceci grâce à un changement d'environnement et de tâche à effectuer. En effet, le paradigme de Posner se présente en général avec de simples carrés blancs sur fond noir dans lesquels une information simple comme une lettre ou un symbole va apparaître. Si ces conditions garantissent une rigueur expérimentale maximale, elle met l'individu face à des stimulus qu'il n'a pas l'habitude de manipuler et de traiter ensemble. De plus, dans la majorité des cas, les participants doivent réaliser une simple tâche de détection ou de discrimination, ou encore, des tâches expérimentales tout aussi éloignées des tâches que l'individu effectue au quotidien, comme une tâche de Flankers ou un Stroop. Dans nos expériences, nous avons troqué l'environnement expérimental classique de laboratoire pour un environnement familier (fast-food). Environnement dans lequel l'individu doit utiliser des indices pour orienter son attention afin d'effectuer des actions sur des objets du quotidien. Cette modification permet à l'individu de se projeter plus facilement dans la tâche, en plus du

caractère écologique supplémentaire qu'elle ajoute. Il serait intéressant de faire de même avec d'autres paradigmes expérimentaux qui n'ont pas encore franchis les portes du laboratoire. On pourrait ainsi espérer toucher un plus large public et acquérir plus de données que ce que nous permettent déjà les versions classiques de ces paradigmes, mais dont les données sont souvent inexploitable à cause d'abandon de la passation, de désengagement des participants ou de consignes mal appliquées par des participants non familiarisés des enjeux fondamentaux de tel paradigme.

Enfin, il est également un autre domaine clinique qui gagnerait à utiliser le paradigme de Posner dans des versions écologiques notamment en réalité virtuelle. Ce domaine est celui du traitement et de l'étude des troubles d'héminégligence spatiale unilatérale (HSU). Ce trouble apparaît chez environ 30% des patients qui ont été victimes d'un accident vasculaire cérébral (AVC). C'est une des atteintes les plus invalidantes après un AVC qui se caractérise par l'incapacité à prendre en compte des stimuli venant de l'hémi-espace opposé à la lésion cérébrale. Par exemple, un patient lésé du côté droit va souvent entrer en collision avec des objets de son environnement qui se trouvent à sa gauche ou ignorer les aliments qui sont à gauche dans son assiette. Il existe plusieurs théories explicatives de l'héminégligence spatiale unilatérale qui est encore aujourd'hui mal connue. On suppose que cela peut être dû à un problème de désengagement de l'attention (Heilman & Van Den Abell, 1980; Kinsbourne, 2013) ou de représentation mentale de l'espace (Bisiach & Luzzatti, 1978) ou encore à un problème de référentiel (égocentrique, allocentrique). Les patients avec héminégligence spatiale unilatérale auraient une déviation vers la droite de la référence égocentrique, due à la distorsion du système de coordonnées spatiales après l'AVC. Il serait extrêmement intéressant d'étudier ces patients via une des versions du paradigme de Posner utilisé dans cette thèse. Il serait alors possible d'étudier ce trouble dans un environnement écologique notamment en réalité virtuelle. Au regard de notre hypothèse sur l'importance de la prise en

compte du référentiel spatiale utilisé, il serait possible d'étudier la manière dont les patients avec HSU traitent l'information reçue sur l'hémichamp impacté à l'aide de miroir. Cela pourrait être l'occasion de mieux comprendre ce trouble et les fonctions cognitives touchées en étudiant leur orientation spatiale en environnement naturel en comparaison à des individus qui ne présentent pas ce trouble. Il serait également intéressant d'essayer de trouver une solution de guidage efficace qui permettrait au patient avec HSU de mieux vivre avec leur difficulté, par exemple en concevant des lunettes de réalité augmentée destinées à orienter leur attention vers des endroits de l'espace qu'ils ont tendance à ignorer. Si ce trouble est dû à un déficit de désengagement comme le suggère la théorie explicative basée sur les théories de Posner, on peut espérer trouver l'indice perceptif qui permettra aux patients de se désengager de l'endroit où ils sont actuellement engagés pour les rediriger vers un autre endroit qu'il ne faut pas ignorer. De plus, il existe actuellement des électroencéphalogrammes mobiles qui peuvent être utilisés en combinaison de la réalité virtuelle. Cette association fournit une perspective unique d'exploration des troubles cognitifs en environnement écologique. En particulier dans l'étude de l'orientation de l'attention spatiale chez les patients atteints d'héminégligence unilatérale.

4.3 Conclusion

En résumé, dans toutes les situations où la rapidité et/ou la précision de traitement sont importantes dans l'adaptation de l'individu à son environnement et des contraintes de la tâche à effectuer, l'orientation de l'attention est un mécanisme cognitif à considérer pour maximiser la prise d'information, la décision et l'action. Les systèmes d'alarme, de guidage attentionnel et d'apprentissage notamment en réalité virtuelle ont tous à gagner des connaissances acquises en sciences cognitives pour concevoir et développer des applications qui orientent l'attention

des individus de manière optimale. Le paradigme de Posner qui permet de mesurer les déplacements de l'attention dans l'espace est un paradigme robuste qui est transférable dans des conditions écologiques. Cet aspect écologique permet d'élargir le champ d'exploration des processus d'orientation de l'attention dans des environnements à 360° complexes et dynamiques qui représentent des situations familières qui peuvent être rencontrées dans nos pratiques quotidiennes et professionnelles. Les secteurs du transport tels que l'automobile, l'aéronautique, la spatiale ainsi que les professions médicales, ont tout intérêt à comprendre ces mécanismes d'orientations pour aider les professionnels dans leur pratique en les guidant vers les informations importantes, notamment en situation d'urgence ou une erreur de traitement peut avoir des conséquences dramatiques. De plus, en augmentant la validité écologique du paradigme de Posner, on peut donner une dimension ludique à un paradigme expérimental de laboratoire peu engageant pour les participants. En effet, en essayant de coller au plus près de ce que les individus expérimentent au quotidien, les expériences réalisées via un paradigme de Posner écologique sont plus parlantes pour les participants. Les sujets peuvent ainsi mieux appréhender la tâche qui leur est demandée et la mettre en lien avec des événements qu'ils ont pu vivre ou pourront vivre dans leur vie. La motivation et l'intérêt pour la tâche peut ainsi être améliorée, notamment lors d'évaluation auprès d'un public qui présente des troubles cognitifs tels que les maladies de Parkinson ou d'Alzheimer et qui ont des difficultés avec les protocoles standards de laboratoire. Enfin, certains troubles cognitifs tels que l'héminégligence spatiale unilatérale qui sont déjà étudiés via le paradigme de Posner pourraient être étudiés dans des situations qui sont particulièrement compliquées pour les patients atteints de ce type de trouble. On pourrait ainsi en apprendre davantage sur les impacts de cette héminégligence sur l'orientation des sujets et tester de différentes solutions pour faciliter leur quotidien.

Si cette thèse s'est intéressée au processus d'orientation dans l'espace dans un objectif

d'amélioration de la performance du traitement de l'information par l'homme aux quotidiens, il reste une dimension à explorer qui réserve autant de découvertes fondamentales et applicatives que celle déjà effectuée sur l'attention spatiale. Il s'agit de la même entité que l'espace vu sous un angle différent en physique : le temps. Les recherches sur l'orientation de l'attention dans le temps sont relativement récentes (Coull, Frith, Büchel, & Nobre, 2000; Griffin, Miniussi, Nobre, et al., 2001; K. Nobre, 2010), mais ont peu déjà entrevu les perspectives applicatives possibles en remplaçant l'orientation des participants dans l'espace utilisé dans cette thèse par l'orientation de l'attention dans le temps. Il serait possible de combiner les deux et voir leurs éventuelles interactions, et étudier si orienter l'attention dans le temps et dans l'espace est plus efficace que l'un ou l'autre séparément dans un objectif de guidage ou d'apprentissage. Des questions qui, nous l'espèrent, seront aubier dans les futures recherches effectuées en sciences cognitives et en sciences de l'ingénieur.

Références bibliographiques

- Aarsland, D., & Kurz, M. W. (2010). The epidemiology of dementia associated with parkinson disease. *Journal of the neurological sciences*, 289(1-2), 18–22.
- Aggius-Vella, E., Kolarik, A. J., Gori, M., Cirstea, S., Campus, C., Moore, B. C., & Pardhan, S. (2020). Comparison of auditory spatial bisection and minimum audible angle in front, lateral, and back space. *Scientific reports*, 10(1), 1–9.
- Aïm, F., Lonjon, G., Hannouche, D., & Nizard, R. (2016). Effectiveness of virtual reality training in orthopaedic surgery. *Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery*, 32(1), 224–232.
- Albery, W. B. (2007). Multisensory cueing for enhancing orientation information during flight. *Aviation, space, and environmental medicine*, 78(5), B186–B190.
- Allsop, J., & Gray, R. (2014). Flying under pressure: Effects of anxiety on attention and gaze behavior in aviation. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 3(2), 63–71.
- Amokrane, K. (2010). *Suivi de l'apprenant en environnement virtuel pour la formation à la prévention des risques sur des sites seveso* (Unpublished doctoral dissertation). Compiègne.
- Awh, E., Armstrong, K. M., & Moore, T. (2006). Visual and oculomotor selection: links, causes and implications for spatial attention. *Trends in cognitive sciences*, 10(3),

124–130.

- Azimi, E., Winkler, A., Tucker, E., Qian, L., Doswell, J., Navab, N., & Kazanzides, P. (2018). Can mixed-reality improve the training of medical procedures? In *2018 40th annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 4065–4068).
- Bailey, R., McNamara, A., Sudarsanam, N., & Grimm, C. (2009). Subtle gaze direction. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 28(4), 1–14.
- Bailey, S. K., Johnson, C. I., Schroeder, B. L., & Marraffino, M. D. (2017). Using virtual reality for training maintenance procedures. In *Interservice/industry training, simulation, and education conference (iitsec)* (Vol. 17108, pp. 1–11).
- Barre, J., Benabbou, A., Corneloup, V., Bourrier, Y., & Job, A. (2017). Simulation et réalité virtuelle pour l'apprentissage des compétences non-techniques en conduite et en médecine des situations d'urgence. In *Journées j-rv (journées de l'afvr)*.
- Bashinski, H. S., & Bacharach, V. R. (1980). Enhancement of perceptual sensitivity as the result of selectively attending to spatial locations. *Perception & psychophysics*, 28(3), 241–248.
- Béquet, A. J., Hidalgo-Muñoz, A. R., Moreau, F., & Jallais, C. (n.d.). Effets du stress et de sa régulation sur les processus perceptifs et cognitifs. In *Onzième colloque de psychologie ergonomique épique 2021* (p. 241).
- Bisiach, E., & Luzzatti, C. (1978). Unilateral neglect of representational space. *Cortex*, 14(1), 129–133.
- Booth, P. (2014). *An introduction to human-computer interaction (psychology revivals)*. Psychology Press.
- Boucheix, J.-M., & Guignard, H. (2005). What animated illustrations conditions can improve technical document comprehension in young students? format, signaling and control

- of the presentation. *European Journal of Psychology of Education*, 20(4), 369–388.
- Boucheix, J.-M., & Lowe, R. K. (2010). An eye tracking comparison of external pointing cues and internal continuous cues in learning with complex animations. *Learning and instruction*, 20(2), 123–135.
- Bouma, A., & Gootjes, L. (2011). Effects of attention on dichotic listening in elderly and patients with dementia of the alzheimer type. *Brain and cognition*, 76(2), 286–293.
- Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual reality: how much immersion is enough? *Computer*, 40(7), 36–43.
- Briand, K. A., Larrison, A. L., & Sereno, A. B. (2000). Inhibition of return in manual and saccadic response systems. *Perception & psychophysics*, 62(8), 1512–1524.
- Bronfenbrenner, U. (1977). Toward an experimental ecology of human development. *American psychologist*, 32(7), 513.
- Bronkhorst, A. W. (2015). The cocktail-party problem revisited: early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 77(5), 1465–1487.
- Brunswik, E. (1943). Organismic achievement and environmental probability. *Psychological review*, 50(3), 255.
- Bucher, H.-J., & Schumacher, P. (2006). The relevance of attention for selecting news content. an eye-tracking study on attention patterns in the reception of print and online media. *Communications*, 31(3), 347–368.
- Bundesen, C., Kyllingsbaek, S., Houmann, K. J., & Jensen, R. M. (1997). Is visual attention automatically attracted by one's own name? *Perception & Psychophysics*, 59(5), 714–720.
- Burkhardt, J.-M. (2003a). Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie française*, 48(2), 35–42.

- Burkhardt, J.-M. (2003b). Réalité virtuelle et ergonomie: quelques apports réciproques. *Le travail humain*, 66(1), 65–91.
- Burkhardt, J.-M. (2007). Immersion, représentation et coopération: discussion et perspectives empiriques pour l'ergonomie cognitive de la réalité virtuelle. *Intellectica*, 45(1), 59–87.
- Buttussi, F., & Chittaro, L. (2018). Effects of different types of virtual reality display on presence and learning in a safety training scenario. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(2), 1063–1076.
- Carmody, D. P., & Lewis, M. (2006). Brain activation when hearing one's own and others' names. *Brain research*, 1116(1), 153–158.
- Carr, N. G. (2011). *Internet rend-il bête?* Laffont.
- Chastine, J., Nagel, K., Zhu, Y., & Hudachek-Buswell, M. (2008). Studies on the effectiveness of virtual pointers in collaborative augmented reality. In *2008 IEEE Symposium on 3D User Interfaces* (pp. 117–124).
- Cheal, M., & Gregory, M. (1997). Evidence of limited capacity and noise reduction with single-element displays in the location-cuing paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(1), 51.
- Chica, A. B., & Lupiáñez, J. (2009). Effects of endogenous and exogenous attention on visual processing: an inhibition of return study. *Brain research*, 1278, 75–85.
- Chica, A. B., Martín-Arévalo, E., Botta, F., & Lupiáñez, J. (2014). The spatial orienting paradigm: how to design and interpret spatial attention experiments. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 40, 35–51.
- Chica, A. B., Sanabria, D., Lupiáñez, J., & Spence, C. (2007). Comparing intramodal and crossmodal cuing in the endogenous orienting of spatial attention. *Experimental brain research*, 179(3), 353–364.

- Clark, R. (2013). *Optical imaging, intelligence collection*. CQ Press, Washington, DC.
- Colavita, F. B. (1974). Human sensory dominance. *Perception & Psychophysics*, *16*(2), 409–412.
- Coull, J. T., Frith, C., Büchel, C., & Nobre, A. (2000). Orienting attention in time: behavioural and neuroanatomical distinction between exogenous and endogenous shifts. *Neuropsychologia*, *38*(6), 808–819.
- Debroise, X. (2010). *Erreurs humaines en aéronautique: une étude du lien entre attention et erreurs* (Unpublished doctoral dissertation). Bordeaux 2.
- DeCarlo, D., & Santella, A. (2002). Stylization and abstraction of photographs. *ACM transactions on graphics (TOG)*, *21*(3), 769–776.
- Dehaene, S. (2013). Les quatre piliers de l'apprentissage, ou ce que nous disent les neurosciences. *ParisTech Review*, *7*.
- Dehaene, S. (2015). Fondements cognitifs des apprentissages scolaires. *L'engagement actif, la curiosité et la correction des erreurs*, *1*.
- De Koning, B. B., Tabbers, H. K., Rikers, R. M., & Paas, F. (2007). Attention cueing as a means to enhance learning from an animation. *Applied Cognitive Psychology: The Official Journal of the Society for Applied Research in Memory and Cognition*, *21*(6), 731–746.
- De Koning, B. B., Tabbers, H. K., Rikers, R. M., & Paas, F. (2009). Towards a framework for attention cueing in instructional animations: Guidelines for research and design. *Educational Psychology Review*, *21*(2), 113–140.
- De Koning, B. B., Tabbers, H. K., Rikers, R. M., & Paas, F. (2010). Attention guidance in learning from a complex animation: Seeing is understanding? *Learning and instruction*, *20*(2), 111–122.
- Delogu, F., & McMurray, P. (2019). Where did that noise come from? memory for sound

- locations is exceedingly eccentric both in front and in rear space. *Cognitive processing*, 20(4), 479–494.
- De Schotten, M. T., Dell’Acqua, F., Forkel, S., Simmons, A., Vergani, F., Murphy, D. G., & Catani, M. (2011). A lateralized brain network for visuo-spatial attention. *Nature Precedings*, 1–1.
- Deubel, H., & Schneider, W. X. (2003). Delayed saccades, but not delayed manual aiming movements, require visual attention shifts. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1004(1), 289–296.
- d’Huart, D. M. (2001). La réalité virtuelle: un média pour apprendre. In *Cinquième colloque hypermédiat et apprentissages* (pp. 331–338).
- Driver, J., & Spence, C. (1998). Cross-modal links in spatial attention. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 353(1373), 1319–1331.
- Driver, J., & Spence, C. J. (1994). Spatial synergies between auditory and visual attention. *Attention and performance XV: Conscious and nonconscious information processing*.
- Duc, A. H., Bays, P., & Husain, M. (2008). Eye movements as a probe of attention. In *Progress in brain research* (Vol. 171, pp. 403–411). Elsevier.
- Duchowski, A. T. (2007). Eye tracking methodology. *Theory and practice*, 328, 614.
- Dufour, A., Lithfous, S., & Després, O. (2018). *Le vieillissement neurodégénératif: méthodes de diagnostic différentiel: Cognition et orientation spatiales-avec programmes interactifs d’évaluation*. Elsevier Health Sciences.
- Dujardin, K., Defebvre, L., & Destée, A. (2007). *Neuropsychologie de la maladie de parkinson et des syndromes apparentés*. Elsevier Masson Issy-les-Moulineaux.
- Dujardin, K., Sockeel, P., Devos, D., Delliaux, M., Krystkowiak, P., Destée, A., & Defebvre, L. (2007). Characteristics of apathy in parkinson’s disease. *Movement Disorders*,

22(6), 778–784.

- Egly, R., Driver, J., & Rafal, R. D. (1994). Shifting visual attention between objects and locations: evidence from normal and parietal lesion subjects. *Journal of Experimental Psychology: General*, *123*(2), 161.
- Egly, R., Rafal, R., Driver, J., & Starrveveld, Y. (1994). Covert orienting in the split brain reveals hemispheric specialization for object-based attention. *Psychological Science*, *5*(6), 380–383.
- Eimer, M. (1997). Uninformative symbolic cues may bias visual-spatial attention: Behavioral and electrophysiological evidence. *Biological Psychology*, *46*(1), 67–71.
- Eimer, M., & Schröger, E. (1998). Erp effects of intermodal attention and cross-modal links in spatial attention. *Psychophysiology*, *35*(3), 313–327.
- Erhel, S., & Jamet, E. (2013). Digital game-based learning: Impact of instructions and feedback on motivation and learning effectiveness. *Computers & education*, *67*, 156–167.
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & psychophysics*, *16*(1), 143–149.
- Eriksen, C. W., & Hoffman, J. E. (1973). The extent of processing of noise elements during selective encoding from visual displays. *Perception & Psychophysics*, *14*(1), 155–160.
- Farah, M. J., Wong, A. B., Monheit, M. A., & Morrow, L. A. (1989). Parietal lobe mechanisms of spatial attention: Modality-specific or supramodal? *Neuropsychologia*, *27*(4), 461–470.
- Fernandez, D. (2010). *L'attention visuelle sélective: pertinence, saillance, résistance à l'interférence* (Unpublished doctoral dissertation). Lyon 2.
- Fernandez-Duque, D., & Posner, M. I. (1997). Relating the mechanisms of orienting and alerting. *Neuropsychologia*, *35*(4), 477–486.

- Feyereisen, T., & Cundiff, C. (2001). Visual cueing and control for general aviation application. In *20th dasc. 20th digital avionics systems conference (cat. no. 01ch37219)* (Vol. 1, pp. 5B1–1).
- Figuroa, M. A. D. (2018). *Peripheral representations: from perception to visual search* (Unpublished doctoral dissertation). University of California, Santa Barbara.
- Findlay, J. M., & Gilchrist, I. D. (1998). Eye guidance and visual search. In *Eye guidance in reading and scene perception* (pp. 295–312). Elsevier.
- Foerster, R. M., Poth, C. H., Behler, C., Botsch, M., & Schneider, W. X. (2016). Using the virtual reality device oculus rift for neuropsychological assessment of visual processing capabilities. *Scientific reports*, 6(1), 1–10.
- Friesen, C. K., & Kingstone, A. (1998). The eyes have it! reflexive orienting is triggered by nonpredictive gaze. *Psychonomic bulletin & review*, 5(3), 490–495.
- Fuchs, P. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. 2). Presses des MINES.
- Fuchs, P. (2016). *Les casques de réalité virtuelle et de jeux vidéo*. Presses des Mines-Transvalor.
- Fuchs, P., Moreau, G., & Berthoz, A. (2003). Le traité de la réalité virtuelle (vol. 1, fondements et interfaces comportementales). *Sciences mathématiques et informatique*.
- Gauglitz, S., Lee, C., Turk, M., & Höllerer, T. (2012). Integrating the physical environment into mobile remote collaboration. In *Proceedings of the 14th international conference on human-computer interaction with mobile devices and services* (pp. 241–250).
- Gibson, B. S., & Bryant, T. A. (2005). Variation in cue duration reveals top-down modulation of involuntary orienting to uninformative symbolic cues. *Perception & psychophysics*, 67(5), 749–758.
- Gibson, B. S., & Egeth, H. (1994). Inhibition and disinhibition of return: Evidence from temporal order judgments. *Perception & Psychophysics*, 56(6), 669–680.

- Girardi, R., & de Oliveira, J. C. (2019). Virtual reality in army artillery observer training. In *2019 21st symposium on virtual and augmented reality (svr)* (pp. 25–33).
- Glaser, M., & Schwan, S. (2015). Explaining pictures: How verbal cues influence processing of pictorial learning material. *Journal of Educational Psychology, 107*(4), 1006.
- Grabe, W. (1986). *Attention and performance, x: Control of language processes*. JSTOR.
- Grant, E. R., & Spivey, M. J. (2003). Eye movements and problem solving: Guiding attention guides thought. *Psychological Science, 14*(5), 462–466.
- Greenwood, P. M., Parasuraman, R., & Haxby, J. V. (1993). Changes in visuospatial attention over the adult lifespan. *Neuropsychologia, 31*(5), 471–485.
- Griffin, I. C., Miniussi, C., Nobre, A. C., et al. (2001). Orienting attention in time. *Frontiers in Bioscience, 6*(12), D660–D671.
- Groen, M., & Noyes, J. (2010). Solving problems: How can guidance concerning task-relevancy be provided? *Computers in human behavior, 26*(6), 1318–1326.
- Guerreiro, M. J., Adam, J. J., & Van Gerven, P. W. (2012). Automatic selective attention as a function of sensory modality in aging. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences, 67*(2), 194–202.
- Guerreiro, M. J., Murphy, D. R., & Van Gerven, P. W. (2010). The role of sensory modality in age-related distraction: A critical review and a renewed view. *Psychological bulletin, 136*(6), 975.
- Handy, T. C., Jha, A. P., & Mangun, G. R. (1999). Promoting novelty in vision: Inhibition of return modulates perceptual-level processing. *Psychological Science, 10*(2), 157–161.
- Harrington, C. M., Kavanagh, D. O., Ballester, G. W., Ballester, A. W., Dicker, P., Traynor, O., ... Tierney, S. (2018). 360 operative videos: a randomised cross-over study evaluating attentiveness and information retention. *Journal of surgical education, 75*(4), 993–1000.

- Harris, K. D., & Thiele, A. (2011). Cortical state and attention. *Nature reviews neuroscience*, *12*(9), 509–523.
- Hawkins, H. L., Hillyard, S. A., Luck, S. J., Mouloua, M., Downing, C. J., & Woodward, D. P. (1990). Visual attention modulates signal detectability. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*(4), 802.
- Hegarty, M., & Steinhoff, K. (1997). Individual differences in use of diagrams as external memory in mechanical reasoning. *Learning and Individual differences*, *9*(1), 19–42.
- Heilman, K. M., & Van Den Abell, T. (1980). Right hemisphere dominance for attention: the mechanism underlying hemispheric asymmetries of inattention (neglect). *Neurology*, *30*(3), 327–327.
- Henderson, J. M., & Hollingworth, A. (1998). Eye movements during scene viewing: An overview. *Eye guidance in reading and scene perception*, 269–293.
- Hendricks, D., Fell, J., & Freedman, D. (1999). The relative frequency of unsafe driving acts in serious traffic crashes. *Report Summary, US Department of Transportation, -National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC*.
- Ho, C., & Spence, C. (2005). Assessing the effectiveness of various auditory cues in capturing a driver's visual attention. *Journal of experimental psychology: Applied*, *11*(3), 157.
- Hoareau, C. (2016). *Elaboration et évaluation de recommandations ergonomiques pour le guidage de l'apprenant en evah: application à l'apprentissage de procédure dans le domaine biomédical* (Unpublished doctoral dissertation). Brest.
- Hodgson, T. L., & Muller, H. J. (1999). Attentional orienting in two-dimensional space. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, *52*(3), 615–648.
- Hoffman, J. E. (1998). Visual attention and eye movements. *Attention*, *31*(2), 119–153.
- Hoffman, J. E., & Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye

- movements. *Perception & psychophysics*, 57(6), 787–795.
- Hollnagel, E. (2010). Extending the scope of the human factor. *Safer complex industrial environments: A human factors approach*, 37–59.
- Hommel, B., Pratt, J., Colzato, L., & Godijn, R. (2001). Symbolic control of visual attention. *Psychological science*, 12(5), 360–365.
- Hooey, B. L. (1996). The effect of automobile head-up displays on driver attention.
- Huk, T., Steinke, M., & Floto, C. (2010). The educational value of visual cues and 3d-representational format in a computer animation under restricted and realistic conditions. *Instructional Science*, 38(5), 455–469.
- James, W. (2007). *The principles of psychology* (Vol. 1). Cosimo, Inc.
- Jamet, E., Gavota, M., & Quaireau, C. (2008). Attention guiding in multimedia learning. *Learning and instruction*, 18(2), 135–145.
- Jang, S., Vitale, J. M., Jyung, R. W., & Black, J. B. (2017). Direct manipulation is better than passive viewing for learning anatomy in a three-dimensional virtual reality environment. *Computers & Education*, 106, 150–165.
- Jang, W., Shin, J.-H., Kim, M., & Kim, K. K. (2016). Human field of regard, field of view, and attention bias. *Computer methods and programs in biomedicine*, 135, 115–123.
- Jeung, H.-J., Chandler, P., & Sweller, J. (1997). The role of visual indicators in dual sensory mode instruction. *Educational Psychology*, 17(3), 329–345.
- Jolival, B. (1995). *La réalité virtuelle*. FeniXX.
- Jose, S., & Gideon Praveen, K. (2010). Comparison between auditory and visual simple reaction times. *Neuroscience & Medicine*, 2010.
- Juan, C.-H., Shorter-Jacobi, S. M., & Schall, J. D. (2004). Dissociation of spatial attention and saccade preparation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(43), 15541–15544.

- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (1999). Managing split-attention and redundancy in multimedia instruction. *Applied Cognitive Psychology: The Official Journal of the Society for Applied Research in Memory and Cognition*, 13(4), 351–371.
- Kawahara, J.-i., & Yamada, Y. (2004). Does one's name attract visual attention? *Visual Cognition*, 11(8), 997–1017.
- Kim, K., Jang, J., Baek, M., & Kim, S. (2016). A comparison of three types of trail making test in the Korean elderly: higher completion rate of trail making test-black and white for mild cognitive impairment. *J Alzheimers Dis Parkinsonism*, 6(239), 2161–0460.
- Kinsbourne, M. (2013). Orientational bias model of unilateral neglect: evidence from attentional gradients within hemispace. In *Unilateral neglect* (pp. 71–94). Psychology Press.
- Kit, D., Katz, L., Sullivan, B., Snyder, K., Ballard, D., & Hayhoe, M. (2014). Eye movements, visual search and scene memory, in an immersive virtual environment. *PLoS One*, 9(4), e94362.
- Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and egocentric spatial representations: Definitions, distinctions, and interconnections. In *Spatial cognition* (pp. 1–17).
- Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B., & Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision research*, 35(13), 1897–1916.
- Kriz, S., & Hegarty, M. (2007). Top-down and bottom-up influences on learning from animations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 65(11), 911–930.
- Kühl, T., Scheiter, K., & GerjeTS, P. (2012). Enhancing learning from dynamic and static visualizations by means of cueing. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 21(1), 71–88.
- Kunde, W., Skirde, S., & Weigelt, M. (2011). Trust my face: cognitive factors of head fakes in sports. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 17(2), 110.

- Lachaux, J.-P. (2011). *Le cerveau attentif: contrôle, maîtrise et lâcher-prise*. Odile Jacob.
- Ladouce, S., Donaldson, D. I., Dudchenko, P. A., & Ietswaart, M. (2017). Understanding minds in real-world environments: toward a mobile cognition approach. *Frontiers in human neuroscience, 10*, 694.
- Langton, S. R., Watt, R. J., & Bruce, V. (2000). Do the eyes have it? cues to the direction of social attention. *Trends in cognitive sciences, 4*(2), 50–59.
- Larson, E. B., Feigon, M., Gagliardo, P., & Dvorkin, A. Y. (2014). Virtual reality and cognitive rehabilitation: a review of current outcome research. *NeuroRehabilitation, 34*(4), 759–772.
- Laurent-Vannier, A., Pradat-Diehl, P., Chevignard, M., Abada, G., & De Agostini, M. (2003). Spatial and motor neglect in children. *Neurology, 60*(2), 202–207.
- Lee, J., & Spence, C. (2015). Audiovisual crossmodal cuing effects in front and rear space. *Frontiers in psychology, 6*, 1086.
- Lee, J. D., & Strayer, D. L. (2004). Preface to the special section on driver distraction. *Human factors, 46*(4), 583–586.
- Lemercier, C., & Cellier, J.-M. (2008). Les défauts de l'attention en conduite automobile: inattention, distraction et interférence. *Le travail humain, 71*(3), 271–296.
- Lenné, M. G., Ashby, K., & Fitzharris, M. (2008). Analysis of general aviation crashes in australia using the human factors analysis and classification system. *The International Journal of Aviation Psychology, 18*(4), 340–352.
- Lepsien, J., Griffin, I. C., Devlin, J. T., & Nobre, A. C. (2005). Directing spatial attention in mental representations: Interactions between attentional orienting and working-memory load. *Neuroimage, 26*(3), 733–743.
- Lewitowicz, J., Szelmanowski, A., Pazur, A., Michalak, S., & Janik, P. (2017). Helmet-mounted display and cueing systems as pilot aids for aviation/maritime search and

- rescue missions. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*.
- Li, C.-L., Aivar, M. P., Kit, D. M., Tong, M. H., & Hayhoe, M. M. (2016). Memory and visual search in naturalistic 2d and 3d environments. *Journal of vision*, *16*(8), 9–9.
- Lin, L., & Atkinson, R. K. (2011). Using animations and visual cueing to support learning of scientific concepts and processes. *Computers & Education*, *56*(3), 650–658.
- Lin, Y.-C., Chang, Y.-J., Hu, H.-N., Cheng, H.-T., Huang, C.-W., & Sun, M. (2017). Tell me where to look: Investigating ways for assisting focus in 360 video. In *Proceedings of the 2017 chi conference on human factors in computing systems* (pp. 2535–2545).
- Litchfield, D., & Ball, L. J. (2011). Rapid communication: Using another’s gaze as an explicit aid to insight problem solving. *Quarterly journal of experimental psychology*, *64*(4), 649–656.
- Litchfield, D., Ball, L. J., Donovan, T., Manning, D. J., & Crawford, T. (2010). Viewing another person’s eye movements improves identification of pulmonary nodules in chest x-ray inspection. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *16*(3), 251.
- Liu, Y.-C. (2003). Effects of using head-up display in automobile context on attention demand and driving performance. *Displays*, *24*(4-5), 157–165.
- Logan, G. D., Taylor, S. E., & Etherton, J. L. (1996). Attention in the acquisition and expression of automaticity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*(3), 620.
- Losier, B. J., & Klein, R. M. (2004). Covert orienting within peripersonal and extrapersonal space: Young adults. *Cognitive brain research*, *19*(3), 269–274.
- Lowe, R., & Boucheix, J.-M. (2011). Cueing complex animations: Does direction of attention foster learning processes? *Learning and Instruction*, *21*(5), 650–663.
- Lowe, R. K. (1999). Extracting information from an animation during complex visual learning. *European journal of psychology of education*, *14*(2), 225–244.

- Lupiáñez, J., Milán, E. G., Tornay, F. J., Madrid, E., & Tudela, P. (1997). Does ior occur in discrimination tasks? yes, it does, but later. *Perception & Psychophysics*, *59*(8), 1241–1254.
- Mackworth, N. H., & Morandi, A. J. (1967). The gaze selects informative details within pictures. *Perception & psychophysics*, *2*(11), 547–552.
- Malbos, E., Boyer, L., & Lançon, C. (2013). L'utilisation de la réalité virtuelle dans le traitement des troubles mentaux. *La Presse Médicale*, *42*(11), 1442–1452.
- Mamikonyan, E., Moberg, P. J., Siderowf, A., Duda, J. E., Ten Have, T., Hurtig, H. I., . . . Weintraub, D. (2009). Mild cognitive impairment is common in parkinson's disease patients with normal mini-mental state examination (mmse) scores. *Parkinsonism & related disorders*, *15*(3), 226–231.
- Maneuvrier Hervieu, A. (2020). *Le sentiment de présence en réalité virtuelle: rôle modérateur des facteurs humains sur la performance* (Unpublished doctoral dissertation). Normandie.
- Mannan, S. K., Ruddock, K. H., & Wooding, D. S. (1996). The relationship between the locations of spatial features and those of fixations made during visual examination of briefly presented images. *Spatial vision*.
- Mao, X., Ou, M. T., Karuppagounder, S. S., Kam, T.-I., Yin, X., Xiong, Y., . . . others (2016). Pathological α -synuclein transmission initiated by binding lymphocyte-activation gene 3. *Science*, *353*(6307).
- Maringelli, F., McCarthy, J., Steed, A., Slater, M., & Umiltà, C. (2001). Shifting visuo-spatial attention in a virtual three-dimensional space. *Cognitive Brain Research*, *10*(3), 317–322.
- Martín-Arévalo, E., Kingstone, A., & Lupiáñez, J. (2013). Is “inhibition of return” due to the inhibition of the return of attention? *The Quarterly Journal of Experimental*

- Psychology*, 66(2), 347–359.
- Mathôt, S., Hickey, C., & Theeuwes, J. (2010). From reorienting of attention to biased competition: Evidence from hemifield effects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(3), 651–657.
- Mautone, P. D., & Mayer, R. E. (2001). Signaling as a cognitive guide in multimedia learning. *Journal of educational Psychology*, 93(2), 377.
- Mayer, R. E. (2010). Learning with technology. *The nature of learning: Using research to inspire practice*, 179–196.
- Mayer, R. E., & Anderson, R. B. (1991). Animations need narrations: An experimental test of a dual-coding hypothesis. *Journal of educational psychology*, 83(4), 484.
- McCloy, R., & Stone, R. (2001). Virtual reality in surgery. *Bmj*, 323(7318), 912–915.
- McDonald, J. J., & Ward, L. M. (1999). Spatial relevance determines facilitatory and inhibitory effects of auditory covert spatial orienting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(5), 1234.
- Mihal, W. L., & Barrett, G. V. (1976). Individual differences in perceptual information processing and their relation to automobile accident involvement. *Journal of Applied Psychology*, 61(2), 229.
- Mondor, T. A., & Zatorre, R. J. (1995). Shifting and focusing auditory spatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(2), 387.
- Moore, C. M., Yantis, S., & Vaughan, B. (1998). Object-based visual selection: Evidence from perceptual completion. *Psychological science*, 9(2), 104–110.
- Mousavi, S. Y., Low, R., & Sweller, J. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of educational psychology*, 87(2), 319.
- Mozer, M. C., & Vecera, S. P. (2005). Space-and object-based attention. In *Neurobiology of*

- attention* (pp. 130–134). Elsevier.
- Müller, H. J., & Rabbitt, P. M. (1989). Spatial cueing and the relation between the accuracy of “where” and “what” decisions in visual search. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *41*(4), 747–773.
- Murata, A. (2004). Effects of duration of immersion in a virtual reality environment on postural stability. *International Journal of Human-Computer Interaction*, *17*(4), 463–477.
- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive psychology*, *9*(3), 353–383.
- Neider, M. B., Gaspar, J. G., McCarley, J. S., Crowell, J. A., Kaczmariski, H., & Kramer, A. F. (2011). Walking and talking: dual-task effects on street crossing behavior in older adults. *Psychology and aging*, *26*(2), 260.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality*. Freeman. New York.
- Nobre, A. C. (2001). Orienting attention to instants in time. *Neuropsychologia*, *39*(12), 1317–1328.
- Nobre, K. (2010). *Attention and time*. Oxford University Press, USA.
- Noy, Y. I. (1990). Selective attention with auxiliary automobile displays. In *Proceedings of the human factors society annual meeting* (Vol. 34, pp. 1533–1537).
- Ocampo, B., & Kahan, T. A. (2016). Evaluating automatic attentional capture by self-relevant information. *Cognitive neuroscience*, *7*(1-4), 22–23.
- Occelli, V., Spence, C., & Zampini, M. (2011). Audiotactile interactions in front and rear space. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *35*(3), 589–598.
- Olk, B., Dinu, A., Zielinski, D. J., & Kopper, R. (2018). Measuring visual search and distraction in immersive virtual reality. *Royal Society open science*, *5*(5), 172331.
- Ozaki, T. J., Ogawa, S., & Takeda, T. (2009). Dissociable neural correlates of reorienting

- within versus across visual hemifields. *Neuroreport*, 20(5), 497–501.
- Paillard, J. (1971). Les déterminants moteurs de l'organisation de l'espace. *Cahiers de psychologie*, 14(4), 261–316.
- Paillard, J. (1985). Les niveaux sensori-moteur et cognitif du contrôle de l'action. *Laurent M. & Therme P.(Eds). Recherches en APS*, 1, 147–163.
- Paillard, J. (1991). Motor and representational framing of space. *Brain and space*, 163–182.
- Pani, J. R., & Dupree, D. (1994). Spatial reference systems in the comprehension of rotational motion. *Perception*, 23(8), 929–946.
- Pashler, H. (1992). Attentional limitations in doing two tasks at the same time. *Current Directions in Psychological Science*, 1(2), 44–48.
- Pederson, E., & Guion-Anderson, S. (2010). Orienting attention during phonetic training facilitates learning. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(2), EL54–EL59.
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual review of neuroscience*, 35, 73–89.
- Peterson, M. S., Kramer, A. F., & Irwin, D. E. (2004). Covert shifts of attention precede involuntary eye movements. *Perception & psychophysics*, 66(3), 398–405.
- Piaget, J. (1966). Biologie et connaissance. *Diogenes*(54), 3.
- Picton, T. W., Stuss, D. T., & Marshall, K. C. (1986). Attention and the brain. *The brain, cognition, and education*, 19–79.
- Poissant, H., Falardeau, M., & Poëllhuber, B. (1993). L'attention en classe: Fonctionnement et applications. *McGill Journal of Education/Revue des sciences de l'éducation de McGill*, 28(002).
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly journal of experimental psychology*, 32(1), 3–25.

- Posner, M. I. (1995). Attention in cognitive neuroscience: An overview.
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual review of neuroscience*, *13*(1), 25–42.
- Posner, M. I., Rafal, R. D., Choate, L. S., & Vaughan, J. (1985). Inhibition of return: Neural basis and function. *Cognitive neuropsychology*, *2*(3), 211–228.
- Posner, M. I., Snyder, C. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of experimental psychology: General*, *109*(2), 160.
- Possamai, B. A., C.A., & Requin, J. (1990). Attention. *Encyclopédie Universalis, supplément, Paris*.
- Pratt, J., Radulescu, P., Guo, R. M., & Hommel, B. (2010). Visuospatial attention is guided by both the symbolic value and the spatial proximity of selected arrows. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, *36*(5), 1321.
- Rafal, R. D., Calabresi, P. A., Brennan, C. W., & Sciolto, T. K. (1989). Saccade preparation inhibits reorienting to recently attended locations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *15*(4), 673.
- Regis, N. (2011). Tunnélisation attentionnelle: Définitions de métriques physiologiques et comportementales pour diagnostiquer la tunnélisation attentionnelle chez un opérateur humain.
- Reuss, H., Pohl, C., Kiesel, A., & Kunde, W. (2011). Follow the sign! top-down contingent attentional capture of masked arrow cues. *Advances in Cognitive Psychology*, *7*, 82.
- Reuter-Lorenz, P. A., Drain, M., & Hardy-Morais, C. (1996). Object-centered attentional biases in the intact brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*(6), 540–550.
- Riggio, L., Bello, A., & Umiltà, C. (1998). Inhibitory and facilitatory effects of cue onset and offset. *Psychological Research*, *61*(2), 107–118.
- Rizzolatti, G., Riggio, L., Dascola, I., & Umiltà, C. (1987). Reorienting attention across the

- horizontal and vertical meridians: evidence in favor of a premotor theory of attention. *Neuropsychologia*, 25(1), 31–40.
- Rodríguez-Ferreiro, J., Cuetos, F., Herrera, E., Menéndez, M., & Ribacoba, R. (2010). Cognitive impairment in parkinson's disease without dementia. *Movement disorders*, 25(13), 2136–2141.
- Roulin, J.-L. (2006). *Psychologie cognitive*. Editions Bréal.
- Roy, M. (2016). *La réalité virtuelle pour l'apprentissage des langues: l'influence de l'immersion, de l'interaction et de la présence sur la communication en langue étrangère: une étude exploratoire auprès d'adolescents apprenant le français ou l'allemand* (Unpublished doctoral dissertation). Strasbourg.
- Ruble, E., Rabaud, V., Konolige, K., & Bradski, G. (2011). Orb: An efficient alternative to sift or surf. In *2011 international conference on computer vision* (pp. 2564–2571).
- Santangelo, V., Van der Lubbe, R. H., Belardinelli, M. O., & Postma, A. (2006). Spatial attention triggered by unimodal, crossmodal, and bimodal exogenous cues: a comparison of reflexive orienting mechanisms. *Experimental brain research*, 173(1), 40–48.
- Schmitt, M., Postma, A., & De Haan, E. (2000). Interactions between exogenous auditory and visual spatial attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 53(1), 105–130.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. detection, search, and attention. *Psychological review*, 84(1), 1.
- Shappell, S. A., & Wiegmann, D. A. (2001). Applying reason: The human factors analysis and classification system (hfacs). *Human Factors and Aerospace Safety*.
- Sheikh, A., Brown, A., Watson, Z., & Evans, M. (2016). Directing attention in 360-degree video.

- Siéroff, É., & Piquard, A. (2004). Attention et vieillissement. *Psychologie & NeuroPsychiatrie du vieillissement*, 2(4), 257–269.
- Simon, H. A. (1986). *The role of attention in cognition*. New York: Academic Press.
- Smith, D. T., & Schenk, T. (2012). The premotor theory of attention: time to move on? *Neuropsychologia*, 50(6), 1104–1114.
- Smith, D. V., Davis, B., Niu, K., Healy, E. W., Bonilha, L., Fridriksson, J., . . . Rorden, C. (2010). Spatial attention evokes similar activation patterns for visual and auditory stimuli. *Journal of cognitive neuroscience*, 22(2), 347–361.
- Soret, R., Charras, P., Hurter, C., & Peysakhovich, V. (2019). Attentional orienting in virtual reality using endogenous and exogenous cues in auditory and visual modalities. In *Proceedings of the 11th acm symposium on eye tracking research & applications* (pp. 1–8).
- Soret, R., Charras, P., Khazar, I., Hurter, C., & Peysakhovich, V. (2020). Eye-tracking and virtual reality in 360-degrees: exploring two ways to assess attentional orienting in rear space. In *Acm symposium on eye tracking research and applications* (pp. 1–7).
- Souchet, A. (2020). *Impacts de la fatigue visuelle sur l'apprentissage via serious game en réalité virtuelle* (Unpublished doctoral dissertation). Université Paris 8.
- Spence, C., & Driver, J. (1997). Audiovisual links in exogenous covert spatial orienting. *Perception & psychophysics*, 59(1), 1–22.
- Spence, C., Lee, J., & Van der Stoep, N. (2017). Responding to sounds from unseen locations: Crossmodal attentional orienting in response to sounds presented from the rear. *European Journal of Neuroscience*.
- Spence, C., & Santangelo, V. (2009). Capturing spatial attention with multisensory cues: A review. *Hearing research*, 258(1-2), 134–142.
- Sridharan, S., Bailey, R., McNamara, A., & Grimm, C. (2012). Subtle gaze manipulation for

- improved mammography training. In *Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications* (pp. 75–82).
- Staffen, W., Kronbichler, M., Aichhorn, M., Mair, A., & Ladurner, G. (2006). Selective brain activity in response to one's own name in the persistent vegetative state. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *77*(12), 1383–1384.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of donders' method. *Acta psychologica*, *30*, 276–315.
- Sternberg, S. (2013). The meaning of additive reaction-time effects: some misconceptions. *Frontiers in Psychology*, *4*, 744.
- Stevens, S. A., West, G. L., Al-Aidroos, N., Weger, U. W., & Pratt, J. (2008). Testing whether gaze cues and arrow cues produce reflexive or volitional shifts of attention. *Psychonomic Bulletin & Review*, *15*(6), 1148–1153.
- Strayer, D. L., Turrill, J., Cooper, J. M., Coleman, J. R., Medeiros-Ward, N., & Biondi, F. (2015). Assessing cognitive distraction in the automobile. *Human factors*, *57*(8), 1300–1324.
- Tabareau, N., Bennequin, D., Berthoz, A., Slotine, J.-J., & Girard, B. (2007). Geometry of the superior colliculus mapping and efficient oculomotor computation. *Biological cybernetics*, *97*(4), 279–292.
- Tabbers, H. K., Martens, R. L., & Van Merriënboer, J. J. (2004). Multimedia instructions and cognitive load theory: Effects of modality and cueing. *British journal of educational psychology*, *74*(1), 71–81.
- Tacikowski, P., & Nowicka, A. (2010). Allocation of attention to self-name and self-face: An erp study. *Biological psychology*, *84*(2), 318–324.
- Tan, H. Z., Gray, R., Spence, C., Jones, C. M., & Rosli, R. M. (2009). The haptic cuing of visual spatial attention: Evidence of a spotlight effect. In *Human vision and electronic*

imaging xiv (Vol. 7240, p. 72400I).

- Tan, H. Z., Gray, R., Young, J. J., & Irawan, P. (2001). Haptic cueing of a visual change-detection task: Implications for multimodal interfaces. *Usability Evaluation and Interface Design: Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality, 1*, 678–682.
- Tatler, B. W., Wade, N. J., Kwan, H., Findlay, J. M., & Velichkovsky, B. M. (2010). Yabus, eye movements, and vision. *i-Perception, 1*(1), 7–27.
- Taylor, T. L., & Klein, R. M. (2000). Visual and motor effects in inhibition of return. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 26*(5), 1639.
- Teder-Sälejärvi, W. A., Münte, T. F., Sperlich, F.-J., & Hillyard, S. A. (1999). Intra-modal and cross-modal spatial attention to auditory and visual stimuli. an event-related brain potential study. *Cognitive Brain Research, 8*(3), 327–343.
- Theeuwes, J. (1992). Perceptual selectivity for color and form. *Perception & psychophysics, 51*(6), 599–606.
- Thomas, L. E., & Lleras, A. (2007). Moving eyes and moving thought: On the spatial compatibility between eye movements and cognition. *Psychonomic bulletin & review, 14*(4), 663–668.
- Thooris, C. (2011). Mise en œuvre d'une méthode de data mining pour appréhender le comportement d'un sujet en état de tunnélisation attentionnelle.
- Tilak, R., Xholi, I., Schowalter, D., Ferris, T., Hameed, S., & Sarter, N. (2008). Crossmodal links in attention in the driving environment: The roles of cueing modality, signal timing, and workload. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 52, pp. 1815–1819).
- To, M., Regan, B., Wood, D., & Mollon, J. (2011). Vision out of the corner of the eye. *Vision Research, 51*(1), 203–214.

- Treisman, A. (1977). Focused attention in the perception and retrieval of multidimensional stimuli. *Perception & Psychophysics*, 22(1), 1–11.
- Treisman, A. (1991). Search, similarity, and integration of features between and within dimensions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(3), 652.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12(1), 97–136.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis* (Vol. 2). Reading, Mass.
- Umiltà, C., Riggio, L., Dascola, I., & Rizzolatti, G. (1991). Differential effects of central and peripheral cues on the reorienting of spatial attention. *European Journal of Cognitive Psychology*, 3(2), 247–267.
- Van der Stoep, N., Nijboer, T., Van der Stigchel, S., & Spence, C. (2015). Multisensory interactions in the depth plane in front and rear space: A review. *Neuropsychologia*, 70, 335–349.
- Veas, E. E., Mendez, E., Feiner, S. K., & Schmalstieg, D. (2011). Directing attention and influencing memory with visual saliency modulation. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems* (pp. 1471–1480).
- Wang, Y., Wu, J., Fu, S., & Luo, Y. (2010). Orienting and focusing in voluntary and involuntary visuospatial attention conditions. *Journal of Psychophysiology*.
- Watson, T. L. W. (2013). Implications of holistic face processing in autism and schizophrenia. *Frontiers in psychology*, 4, 414.
- Webel, S., Bockholt, U., Engelke, T., Gavish, N., Olbrich, M., & Preusche, C. (2013). An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(4), 398–403.
- Weiß, K. (2020). Exogeneous spatial cueing beyond the near periphery: Cueing effects in a

- discrimination paradigm at large eccentricities. *Vision*, 4(1), 13.
- Welford, A. T. (1952). The ‘psychological refractory period’ and the timing of high-speed performance—a review and a theory. *British Journal of Psychology. General Section*, 43(1), 2–19.
- Wellner, P., & Freeman, S. (1993). The doubledigitaldesk: Shared editing of paper documents. *XEROX Euro PARC Technical Report EPC-93-108*.
- Wiegmann, D. A., & Shappell, S. A. (2001). *Human error analysis of commercial aviation accidents using the human factors analysis and classification system (hfacs)* (Tech. Rep.). United States. Office of Aviation Medicine.
- Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature reviews neuroscience*, 5(6), 495–501.
- Wu, C.-T., Weissman, D., Roberts, K., & Woldorff, M. (2007). The neural circuitry underlying the executive control of auditory spatial attention. *Brain research*, 1134, 187–198.
- Xie, H., Mayer, R. E., Wang, F., & Zhou, Z. (2019). Coordinating visual and auditory cueing in multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*, 111(2), 235.
- Yantis, S., & Jonides, J. (1984). Abrupt visual onsets and selective attention: evidence from visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 10(5), 601.
- Yantis, S., & Jonides, J. (1990). Abrupt visual onsets and selective attention: voluntary versus automatic allocation. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 16(1), 121.
- Yarbus, A. L. (1967). Eye movements during perception of complex objects. In *Eye movements and vision* (pp. 171–211). Springer.
- Young, J. J., Tan, H. Z., & Gray, R. (2003). Validity of haptic cues and its effect on priming

visual spatial attention. In *11th symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems, 2003. haptics 2003. proceedings.* (pp. 166–170).

Zampini, M., Torresan, D., Spence, C., & Murray, M. M. (2007). Auditory–somatosensory multisensory interactions in front and rear space. *Neuropsychologia*, *45*(8), 1869–1877.

Zanto, T. P., & Gazzaley, A. (2014). Attention and ageing.