THÈSE
Pour obtenir le grade de Docteur

Délivrée par **Université Paul-Valery**

Préparée au sein de l'école doctorale 60
"Territoire,Temps,Société,Développement"
et de l'unité de recherche EA 4556 "Laboratoire Epsylon"

Spécialité : **Psychologie Cognitive**

Présentée par : **Jean-Christophe HURAULT**

SE SENTIR AGENT DE SON APPRENTISSAGE

Étude du sens de l'agentivité dans l'apprentissage, au travers d'un dispositif de réalité virtuelle

Soutenue le 01 octobre 2021 devant le jury composé de

Dr. Lionel BRUNEL, HDR, Univ. Montpellier	Directeur de thèse
Pr. Pascale PIOLINO, HDR, Univ. Paris	Rapportrice
Dr. Guillaume VALLET, HDR, Univ. Clermont	Rapporteur
Dr Élodie LABEYE, MCF, Univ. Toulouse	Examinatrice
Dr. Valérie GYSELINCK, DR, Univ. Gustave Eiffel	Examinatrice
Pr. André TRICOT, HDR, Univ. Montpellier	Examinateur

Résumé

Le sens de l'agentivité est une notion qui fait référence à l'expérience subjective de contrôler ses actions, mais également aux mécanismes qui permettent d'attribuer une origine causale aux événements. Elle permet de se sentir agent, c'est-à-dire de ressentir un lien entre des modifications de l'environnement et ses actions afin de s'en attribuer l'origine. Ce vécu s'enracine ainsi clairement à la fois sur des mécanismes sensorimoteurs, mais également sur des mécanismes cognitifs. Cela nous amène à réfléchir sur la place que peut avoir le sens de l'agentivité dans le processus d'apprentissage. La thèse que nous défendons dans ce travail est qu'il y a un intérêt à étudier la notion d'agentivité pour mieux comprendre la dynamique d'apprentissage. Dans une première étude, nous présentons une nouvelle mesure du sens de l'agentivité au travers de la validation d'une échelle, la French – Sense of Agency Scale (F-SoAS). La deuxième étude permet de confirmer les liens de cette échelle F-SoAS avec des mesures classiques du sens de l'agentivité. Enfin, au travers de la troisième puis quatrième étude, nous analysons directement l'influence du sens de l'agentivité dans l'apprentissage d'une connaissance abstraite. De manière générale, ce travail montre que plus une personne se sent agent, plus elle sera en mesure de bénéficier d'une situation d'apprentissage, potentiellement au travers de différences dans la prise de perspective ou l'auto-réflexion. Ce travail a été réalisé, notamment, à l'aide de la réalité virtuelle qui, par sa forte immersion sensorielle et ses nombreux moyens d'interaction physique, s'inscrit dans un avenir prometteur des nouvelles technologies d'apprentissage.

Mots-clés : Sens de l'Agentivité, Apprentissage Constructiviste, Intégration Sensorimotrice, Réalité Virtuelle

Abstract

The sense of agency is a recent notion which refers to the subjective experience of controlling one's own actions, but also to the mechanisms which allow one to attribute a causal origin to the events. It allows one to experience oneself as an agent, i.e. to feel a link between changes in the environment and one's own actions in order to attribute an origin to them. This experience is thus clearly rooted both in sensorimotor mechanisms and in cognitive mechanisms. This leads us to reflect on the place that the sense of agency can have in the learning process. The argument that we defend in this thesis's work is that there is an interest in investigating the notion of sense of agency in order to gain a better understanding of the dynamics of learning. In the first experiment, we present a new measure of the sense of agency through the validation of a scale, the French - Sense of Agency Scale (i.e., F-SoAS). The second experiment allows us to confirm the relationship of this F-SoAS scale with classical measures of the sense of agency. Finally, through the third and fourth experiments, we directly analyze the influence of the sense of agency in the learning of an abstract mathematical knowledge, the arithmetic mean, with. In general, this work shows that the more a person feels like an agent, the more he, or she will be able to benefit from a learning situation, potentially through differences in perspective taking or self-reflection. This work was carried out, in particular, with the use of a virtual reality device, which, by its strong sensory immersion and its many possibilities of physical interaction, is part of a promising future of the new technologies for learning.

Keywords : Sense of Agency, Constructivist Learning, Sensorimotor Integration, Virtual Reality

Remerciements

Je tiens à remercier ici toutes les personnes qui ont permis ce travail de thèse et qui ont contribué à sa réalisation.

Tout d'abord, mes premiers remerciements vont naturellement à mon directeur de recherche, Lionel Brunel, qui m'a encadré depuis la L2. C'est grâce à toi que j'ai découvert et me suis orienté vers la psychologie cognitive. Je le remercie pour tes enseignements et tes conseils tant théoriques que méthodologiques, ainsi que pour le soutien et les encouragements que tu m'as témoignés.

Ce travail n'aurait bien évidemment pas été possible sans le soutien et la confiance de l'équipe SENSEI qui m'ont permis d'appréhender la psychologie cognitive dans le monde professionnel et de prendre conscience de l'application de cette matière au quotidien. De plus, je les remercie chaleureusement de nous avoir prêté le matériel de réalité virtuelle, utilisé dans les présents travaux de thèse. Enfin, je n'oublierai jamais l'expérience humaine que j'ai vécue avec vous. Adrien, Florent, Olivier et Yves, un grand merci à vous tous et à bientôt !

J'adresse mes remerciements à Pascale Piolino et à Guillaume Vallet, de l'honneur qu'ils me font en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse. Je tiens aussi à remercier André Tricot, Élodie Labeye et Valérie Gyselinck qui ont accepté d'être examinateurs.

Obligeamment, mes remerciements vont aussi aux doctorant·e·s, post-doctorant·e·s : César Broche, Sibylle Turo, Lorène Causse, Lola Crône, Kévin De Checchi, Amandine Decombe, Marie-Julie Demedardi, Edouard Giudicelli, Théo Héritier, Frédéric Collin, Satya Lancel, Vincent Murday, José Samaniego, Christine Sanchez et Justine Walter ; ainsi que les anciens : Johan Briglia, Thomas Camus, Fabrice Da Silva, Romàn Josa, Anne-Claire Large, Clémence Mazzocco, Arthur Michalland, Philippe Servajean, la "Dream team" qui ont rendu ce projet possible. Non content de faire partie d'une équipe solidaire, d'avoir rencontré des personnes formidables, aussi professionnellement qu'humainement.
Je renouvelle toute mon amitié et ma sympathie à ceux, que j'ai peut-être oubliés, mais qui m'ont accordé du temps et m'ont témoigné un soutien dans ce long travail de recherche (si je vous ai oublié, je vous paye un petit verre).

Je tiens également à remercier mes amis de toujours dont la présence est indispensable à ma vie et à ma santé mentale. Merci d'abord à mes frères : Guillaume, Yann et Kévin.

Je remercie chaleureusement ma famille pour leur encouragement et leur soutien inconditionnel tout au long de ces années. Mes remerciements vont tout particulièrement à mon père qui se demande encore combien de temps je vais être étudiant et quand est-ce que je vais commencer à cotiser pour ma retraite.

Et surtout, merci à ma biquette, pour ton aide précieuse pour finir ce manuscrit, pour ton affection et ton soutien sans faille depuis le début et pour n'avoir pas cessé d'y croire. Tu as été ma motivation et ma force pour aller au bout de ce travail. Je t'aime !

"Un vainqueur est un rêveur qui n'abandonne jamais"
Nelson MANDELA

Sommaire

Introduction **1**

1 ÉTAT DE L'ART **4**

1.1 La place de l'action dans l'apprentissage 4

1.1.1 La théorie de la perception directe 4

1.1.2 La théorie idéomotrice 10

1.1.3 La théorie constructiviste 13

1.1.4 Modèles de construction d'une connaissance abstraite 16

1.2 La place de l'individu comme agent 19

1.2.1 Les approches du sens de l'agentivité 19

1.2.1.1 Approche prédictive 19

1.2.1.2 Approche postdictive 21

1.2.1.3 Limites de l'approche prédictive et postdictive 24

1.2.1.4 Approche intégrative 26

1.2.2 Les mesures de l'agentivité 29

1.2.2.1 Les mesures actuelles du sens de l'agentivité 29

1.2.2.2 Les limites des mesures actuelles et l'intérêt d'une mesure globale 30

1.2.3 L'agentivité globale, facteur d'apprentissage ? 35

1.3 La place de l'outil de réalité virtuelle 38

1.3.1 Présentation de la Réalité Virtuelle (RV) 38

1.3.1.1 Définitions 38

1.3.1.2 Bref historique de la RV 39

1.3.1.3 Les dispositifs de RV 41

1.3.1.4 Les notions fondamentales de la RV 43

1.3.2 La réalité virtuelle (RV) et l'apprentissage 45

1.3.3 Conclusion de l'état de l'art 49

2 PARTIE EXPÉRIMENTALE **50**

2.1 Axe 1 : Validation d'une mesure globale de l'agentivité 51

2.1.1 Introduction et objectif 51

2.1.2 Étude 1 : Analyses Factorielles de l'échelle de F-SoAS 54

2.1.2.1 Méthode 55

2.1.2.2 Analyses statistiques 57

2.1.2.3 Résultats . . . 60
2.1.2.4 Discussion . . . 65
2.1.3 Étude 2 : Validité externe de l'échelle F-SoAS . . . 68
2.1.3.1 Méthode . . . 70
2.1.3.2 Traitements et Analyses statistiques . . . 74
2.1.3.3 Résultats . . . 75
2.1.3.4 Discussion . . . 79
2.1.4 Synthèse de l'axe 1 . . . 82
2.2 Axe 2 : Le sens de l'agentivité et l'apprentissage . . . 84
2.2.1 Introduction et objectifs . . . 84
2.2.2 Étude 3 : Agentivité et apprentissage actif . . . 88
2.2.2.1 Méthode . . . 90
2.2.2.2 Résultats . . . 96
2.2.2.3 Discussion . . . 100
2.2.3 Étude 4 : Agentivité et apprentissage passif . . . 103
2.2.3.1 Méthode . . . 104
2.2.3.2 Résultats . . . 108
2.2.3.3 Discussion . . . 112
2.2.4 Synthèse de l'axe 2 . . . 115

3 DISCUSSION GÉNÉRALE 117
3.1 Rappel de la problématique . . . 117
3.2 Synthèse de nos recherches . . . 118
3.2.1 Synthèse de l'état de l'art . . . 118
3.2.2 Synthèse de l'expérimentation . . . 121
3.3 Réponses à la problématique . . . 124
3.4 Limites de la recherche . . . 126
3.4.1 Limites de l'étude 1 . . . 126
3.4.2 Limites de l'étude 2 . . . 127
3.4.3 Limites de l'étude 3 . . . 129
3.4.4 Limites de l'étude 4 . . . 130
3.5 Mises en perspective . . . 132
3.5.1 Perspectives liées à l'échelle d'agentivité globale . . . 132
3.5.2 Perspectives liées à la Réalité Virtuelle . . . 135
3.5.3 Perspectives liées aux liens entre agentivité et apprentissage . . . 138
3.6 Conclusion Générale . . . 141

Bibliographie 142
Références . . . 142

INTRODUCTION

«L'expérience ce n'est pas ce qui nous arrive, mais ce que nous faisons avec ce qui nous arrive». Cette phrase écrite dans un recueil de poésie par Aldous HUXLEY, qui n'a pourtant jamais étudié les sciences cognitives, illustre l'idée que l'apprentissage ne passe pas directement par nos expériences, mais par notre capacité à nous les approprier, soit, par ce que nous appelons l'agentivité.

En effet, le sens de l'agentivité fait référence à l'expérience subjective de contrôler ses actions, comprenant ainsi le mouvement et les conséquences produites. Il permet de se sentir agent, c'est-à-dire que *« je »* suis celui qui est à l'origine d'un événement dans le monde et d'attribuer une origine causale aux événements (Haggard & Chambon, 2012). Il est important de préciser que, comme pour d'autres aspects de l'expérience humaine, le sens de l'agentivité n'est pas la représentation infaillible d'une réalité objective. En effet, notre cognition semble construire activement cette agentivité afin de générer une cohérence, qui n'est pas obligatoirement fondée sur une agentivité causale objective.

Bien que ce phénomène ait des implications sur l'ensemble du fonctionnement cognitif, nous avons fait le choix de consacrer nos travaux sur les liens entre l'agentivité et l'apprentissage. En effet, l'apprentissage est un sujet central des recherches en psychologie, pratiquement depuis ses débuts en tant que science (par ex., Ebbinghaus, 1885 ; Thorndike, 1911), et abordé dans tous ses champs d'application. Néanmoins, définir ce qu'est l'apprentissage s'avère souvent très complexe, car trop intrusif ou exclusif des phénomènes humains. C'est pourquoi, concernant cette thèse, nous avons adopté une définition fonctionnelle. Nous voyons donc l'apprentissage comme une adaptation ontogénétique, c'est-à-dire qu'il s'agit des changements de comportement d'un organisme en réponse à des régularités de son environnement (De Houwer, Barnes-Holmes, & Moors, 2013). Sans changement, pas de nécessité pour l'organisme de s'adapter et donc d'apprendre.

Depuis les dernières décennies, de nombreuses recherches en psychologie cognitive, neurosciences, philosophie, et bien d'autres, ont apporté des preuves sur la nécessité de considérer le corps comme une facette indispensable à la cognition. Ces recherches remettent en question les bases de l'approche cognitiviste traditionnelle de l'apprentissage et considèrent la connaissance comme une construction individuelle, intégrée aux expériences passées de l'individu. Au regard de cette théorie dite "constructiviste", la connaissance est reconstruite lors des interactions actuelles de manière à modifier le comporte-

ment de l'individu pour assurer une cohérence optimale des événements entre eux et ainsi "faire sens". L'agentivité est donc une notion qui s'inscrit dans cette approche contemporaine de l'apprentissage. L'individu est vu comme un agent qu'il convient de mettre dans un environnement adapté à des interactions pertinentes pour construire une connaissance.

À l'aune de la notion d'agentivité, nous pouvons avoir tendance à dire spontanément que l'individu est au centre de son apprentissage. Pourtant, la question de la place de l'apprenant en tant qu'agent est souvent prise pour acquise, directement issue de l'interaction. **C'est pourquoi, il est pertinent de se demander quel est réellement le lien entre l'agentivité et l'apprentissage. Autrement dit, dans quelle mesure notre capacité à se sentir agent, lors de nos interactions, va-t-elle impacter l'apprentissage issu de celles-ci ?**

Afin de répondre à cette problématique, nous avons réalisé un ensemble de travaux basés sur un questionnaire d'agentivité, mais également sur une situation d'apprentissage constructiviste. Pour réaliser la plupart de nos travaux, nous avons fait le choix d'utiliser la réalité virtuelle qui est un outil pertinent pour encadrer les interactions d'un individu de façon authentique. En effet, elle permet une immersion sensorielle très forte et offre de nombreux moyens d'interaction basés sur la majorité des mouvements de l'individu. Son intérêt est d'autant plus fort qu'elle s'inscrit dans une révolution numérique et technologique ainsi que dans un tournant théorique sur l'approche psychologique de la cognition humaine.

Ces travaux ont pour objectif de montrer que le sens de l'agentivité doit être envisagé comme l'un des déterminants essentiels de l'apprentissage et doit être pris en compte dans le développement d'activités pédagogiques, notamment celles issues des nouvelles technologies immersives.

Dans cette perspective, **la première partie de la thèse présentera les différents éléments théoriques supportant les présentes recherches**. Il est question, dans un premier temps, de comprendre quelle est la place de l'action dans l'apprentissage. Partant de l'interdépendance fonctionnelle entre action et perception (*théorie de la perception directe*), nous verrons comment l'émergence d'intentions est issue des associations entre actions et conséquences (*théorie idéomotrice*). Ce principe va permettre de donner sens aux informations sensorimotrices et rendre ainsi possible un apprentissage (*théorie constructiviste de l'apprentissage*) notamment, de connaissances abstraites fondées sur un un processus d'appariement global (*modèles de construction d'une connaissance abstraite*). À partir de ces théories, la place de l'individu dans cet apprentissage sera questionnée, notamment au travers de ses caractéristiques personnelles. Ce deuxième temps permettra

d'examiner la caractéristique qui semble centrale pour faire sens de nos actions et faire émerger notre conscience, le sens de l'agentivité. Enfin, dans un troisième temps, l'outil de la réalité virtuelle, ayant servi à étudier le sens de l'agentivité et ses liens avec l'apprentissage, sera présenté. Nous discuterons de son intérêt sur le plan de la pédagogie avant de détailler le matériel utilisé ici.

La deuxième partie de la thèse présentera les travaux expérimentaux répondant à deux objectifs distincts, mais complémentaires : la validation du questionnaire d'agentivité et l'exploration des liens entre l'agentivité et l'apprentissage. Cette partie s'axera, tout d'abord, sur l'élaboration et la validation d'un nouvel outil de mesure (échelle F-SoAS) reflétant une dimension individuelle, décontextualisée et stable, de l'agentivité. Pour ce faire, deux études ont été réalisées. L'une permettant de valider cette échelle de l'agentivité globale par deux analyses factorielles (exploratoire et confirmatoire). L'autre, mesurant les corrélations entre cette nouvelle échelle et les mesures classiques de l'agentivité. Cette même partie s'axera, ensuite, sur l'influence de l'agentivité en situation d'apprentissage. Celle-ci fait l'objet d'une première étude portant sur les liens entre agentivité et apprentissage lors d'une exploration active. Puis, d'une deuxième étude, mettant en évidence l'intérêt de prendre en compte l'agentivité comme facteur important de l'apprentissage par observation.

Enfin, **la troisième partie portera sur une discussion générale** dans laquelle nous ferons une synthèse de nos travaux et essayerons de répondre à la problématique de nos recherches. Nous nous attarderons également sur les limites de nos études et présenterons les perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre 1

ÉTAT DE L'ART

Ce premier chapitre a vocation à présenter un état de l'art abordant les questions de la place de l'action, ainsi que de celle de l'individu, dans l'apprentissage. Il permet de comprendre les fondements de nos expérimentations, exposées dans le chapitre suivant. Dans cet objectif, il nous apparaît important d'intégrer dans ce chapitre, des éléments théoriques portant sur l'intérêt de l'utilisation de la réalité virtuelle sur le plan pédagogique, permettant notamment de comprendre le choix de cet outil pour réaliser certaines de nos études.

1.1 La place de l'action dans l'apprentissage

La nature des liens qu'entretient la cognition avec la perception et l'action est un élément fondamental qui est au coeur de toutes sciences cognitives. De ce fait, avant de discuter de l'apprentissage, il convient de définir une approche du fonctionnement de la cognition humaine.

1.1.1 La théorie de la perception directe

Se questionnant sur notre façon de percevoir le monde qui nous entoure et son implication sur le fonctionnement humain, James J. Gibson a proposé la théorie de la perception directe. Elle suppose que la perception est *"un acte psychosomatique, non de l'esprit ou du corps, mais d'un observateur vivant"* (Gibson, 1979, p. 240), et refuse au cerveau la responsabilité seule d'apporter du sens à la perception. Cette théorie propose plutôt que l'environnement offre directement des informations structurées et donc signifiantes. Les travaux de Gibson soutiennent que les informations nécessaires pour comprendre notre environnement sont déjà présentes dans le champ d'informations ambiantes et ne nécessitent pas de représentations mentales sur lesquelles seraient faits des traitements symboliques. Pour lui, la cognition se comprend avant tout par son appartenance, et donc son immersion et ses interactions constantes, à un environnement particulier.

La théorie de la perception directe s'oppose à l'approche cognitiviste, traditionnelle en psychologie cognitive. Fondée notamment sur le dualisme corps-esprit de Descartes (1641), il s'agit d'une extension plus moderne du représentationnalisme (Fodor, 1981). Cette théorie soutient l'hypothèse d'une perception indirecte, possible par l'intermédiaire de représentation mentale. Le cerveau est compris comme un matériel biologique supportant l'élaboration de représentation et la cognition comme le riche processus des représentations mentales, sur lesquelles seraient effectués des traitements symboliques. Relayant la perception, et par conséquent l'action, au rang d'épiphénomène (Hurley, 2001). Ils sont vus comme distincts par nature et reliés de façon séquentielle par des processus mentaux qui prennent des perceptions comme entrées et utilisent des commandes motrices comme sorties afin de produire des actions (par ex., Fodor & Pylyshyn, 1988). Cette approche repose en conséquence sur l'analogie de la cognition vue comme un ordinateur, utilisant des symboles qui n'entretiennent pas de lien entre ce qu'ils représentent et ce qu'ils manipulent. En effet, l'esprit doit pouvoir manipuler et traduire des notions qui lui sont extérieurs, nécessitant des représentations mentales symboliques, traitées par des processus cognitifs de raisonnement et d'inférence. Cette approche cognitiviste repose ainsi sur la notion de représentation amodale, induite nécessairement par son dualisme corps-esprit, pourtant extrêmement difficile, voire impossible, à démontrer (Damasio, 1994).

En rupture avec cette approche, la théorie de Gibson propose de dépasser cette vision d'une cognition "abstraite" (ou amodale). Il propose de réunifier les trois notions clés que sont, la perception, la cognition et l'action au sein d'un système cohérent et interdépendant, évitant les difficultés ontologiques et épistémologiques précédentes. De ce fait, un individu est défini comme un animal évoluant au sein d'un environnement particulier et devant s'y adapter constamment pour survivre. La cognition aurait alors émergé et se serait développée pour permettre de meilleures adaptations du sujet à l'environnement. Partant de cette hypothèse, la cognition, la perception et l'action seraient intrinsèquement liées et fondées sur un principe d'émergence. Il n'y a plus besoin d'user de représentation amodale pour percevoir et agir. Gibson propose que la perception soit basée sur les informations issues des structures du champ d'information ambiant et que l'action soit guidée par la détection d'affordances, ou de possibilités d'action en accord avec nos capacités. Ces informations ne seraient ni une propriété de l'environnement (externe), ni une propriété de l'individu (interne) mais seraient les structures accessibles à l'individu, émergeant lors de ses actions dans l'environnement (voir figure 1). Dès lors, l'idée d'une perception basée sur la stimulation sensorielle selon l'intensité énergétique suffisante pour activer le récepteur est rejetée. Il s'agirait plutôt de la structure énergétique ambiante (par ex., optique, mécanique, acoustique) stimulant les récepteurs sensoriels (par ex., visuels, vestibulaires, auditifs) qui fournit l'information pour la perception.

Ces informations peuvent être très riches, issues des différentes structures sensorielles provoquées par le mouvement de l'individu qui génèrent des changements spatio-temporels de la structure de l'information. La perception va pouvoir extraire de ces changements des invariants structuraux stables et accéder aux caractéristiques des déplacements, de soi-même ou des autres par rapport à lui (Gibson, 1979 ; Michaels & Carello, 1981 ; Warren Jr, 1998).

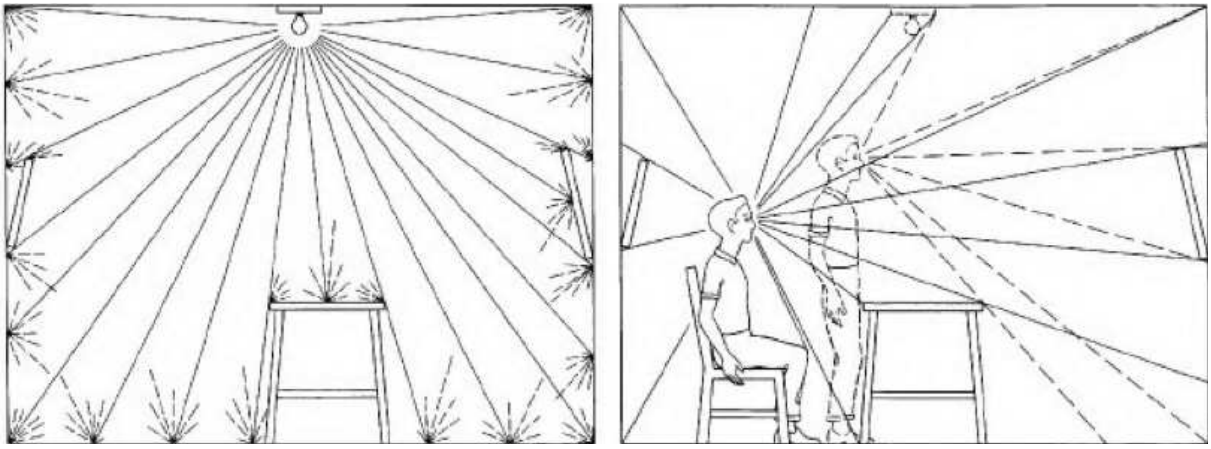

FIGURE 1 – Le champ d'information (optique) ambiant. Issu de Gibson (1979).

Concernant les affordances, ou capacités d'action, elles dépendent des propriétés morphologiques et physiologiques de notre corps, réduisant ainsi les interactions sensorimotrices possibles avec l'environnement. Elles impliquent que *«voir les choses, c'est voir comment se déplacer parmi elles et ce qu'il faut faire ou ne pas faire avec elles»* (Gibson, 1979, p. 223). Un individu va être en mesure de voir directement si une action est possible ou impossible selon ses propres capacités d'action (Araujo, Davids, & Hristovski, 2006 ; Fajen, Riley, & Turvey, 2008). Pour percevoir les affordances au travers des informations environnementales, il doit faire correspondre les propriétés de l'environnement aux propriétés de son corps. Il a été proposé que les individus devaient calibrer les dimensions environnementales en fonction de mesures intrinsèques, basées sur le corps (Gibson, 1979 ; Stoffregen, 2003). Ainsi, c'est en se référant aux propriétés morphologiques et physiologiques de notre corps que la valeur et le sens des informations deviennent disponibles. Par exemple, une pierre peut être décrite comme un ensemble de combinaisons physiques (par ex., masse et diamètre). Cependant, le sens et la fonction de cette pierre émergent lorsque l'individu interagit avec elle et selon le membre de préhension, morphologiquement compatible en taille et en forme, disponible pour agir. Comme le suggère la figure 2 ci-dessous, la pierre peut constituer un endroit pour se cacher ou grimper pour une souris, un endroit où chercher une proie pour un chat, ou encore, pour un être humain, quelque chose que l'on peut jeter, utiliser en outil ou un obstacle sur lequel on peut se faire blesser les pieds.

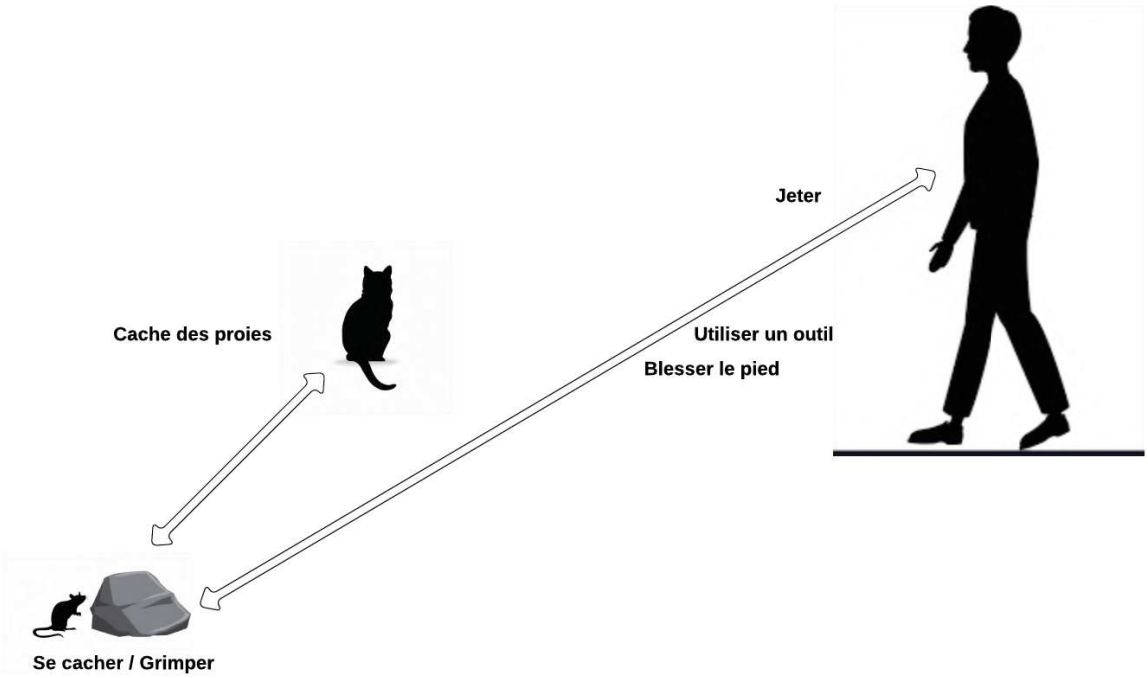

FIGURE 2 – Exemples d'affordances selon l'animal.

En ce sens, les affordances réduisent ce qui pourrait être un nombre infini d'actions possibles à quelques-unes seulement, celles correspondant au corps de l'individu. Elles ne sont pas le résultat final de processus réflexifs conscients, de même que la limite des actions ne dépend pas de la volonté de l'individu. Au contraire, les possibilités d'action perçue émergent au cours de ces constantes calibrations perceptuelles entre la capacité d'action de l'individu et les propriétés accessibles de l'environnement. Ces capacités d'actions dépendent des propriétés morphologiques de l'individu ainsi que de ses propriétés dynamiques (par ex., physiologique) (Stoffregen, 2003). Il en résulte que cette théorie permet de faire l'économie de processus cognitif médiateur (par ex., inférentiels) car l'information peut être contenue dans les invariants structuraux détectés lors des interactions avec l'environnement. La perception est donc qualifiée de directe.

Afin de mesurer les affordances, Tucker et Ellis ont proposé l'utilisation des méthodes de compatibilité S-R (Stimulus-Réponse). Elles font référence aux différences de performance, généralement le temps de réaction ou la précision, en fonction des paires entre les ensembles de stimulus et les ensembles de réponses. Ainsi, dans une série d'expériences, ils ont montré que les objets "potentialisent" les actions même lorsque le but d'une tâche n'est pas d'interagir directement avec l'objet (Tucker & Ellis, 1998, 2001, 2004). Plus précisément, dans leur première étude, ils ont montré que la position de la poignée d'un objet visuel avait un effet significatif sur la vitesse de réponse à la pression d'une touche, même si la position de la poignée n'était pas pertinente pour la tâche (décider si l'objet était

à l'endroit ou à l'envers - Tucker & Ellis, 1998). Par exemple, l'orientation de la poignée vers la droite facilitait la réponse à la pression de la touche effectuée avec la main droite (voir figure 3, côté gauche).



FIGURE 3 – (Gauche) Images de l'expérience de Tucker et Ellis (1998). (Droite) Le dispositif de réponse utilisé pour enregistrer les prises de précision et de puissance.

Dans une autre étude, les participants ont vu des objets et ont décidé s'ils étaient naturels ou fabriqués (Tucker & Ellis, 2001). La mesure de la réponse consistait à effectuer une saisie de précision ou de puissance pour répondre "naturel" ou "fabriqué" (voir figure 3, côté droit). Ainsi, la saisie elle-même (puissance ou précision) n'était pas pertinente pour la tâche, mais pouvait être compatible ou incompatible avec l'objet perçu (par ex., un raisin par rapport à un marteau). Les résultats ont montré que la perception d'un objet saisi avec une prise de précision ou de force facilite une action appropriée (précision ou force). Autrement dit, que la compatibilité de saisie influence la vitesse de réponse. Suggérant que les objets peuvent être perçus automatiquement pour leurs actions potentielles. Ces paradigmes ont été adoptés par de nombreux autres chercheurs et sont désormais les plus couramment utilisés dans l'étude des affordances (par ex., Kourtis & Vingerhoets, 2015). Les stimuli sont souvent des images d'objets manipulables (par ex., une tasse, une poêle ou une théière), le plus souvent des objets dont les poignées sont orientées vers la gauche ou la droite et auxquelles les réponses sont obtenues en appuyant sur une touche. Les participants peuvent avoir à effectuer une action qui est soit en accord avec un objet (compatible ou congruent), soit en désaccord (incompatible ou incongruent). Les expériences utilisant ces paradigmes montrent généralement un avantage lorsque la main de réponse (gauche ou droite) et la poignée de l'objet sont congruentes plutôt qu'incongruentes. Cela suggère que les propriétés manipulables des objets offrent des affordances, ou potentiels d'action, spécifiques. Cette théorie permet donc de faire l'économie de processus cognitif médiateur (par ex., inférentiels) car l'information peut être contenue dans les invariants structuraux détectés lors d'interactions avec l'environnement. Qualifiant alors la perception de directe.

Il est important de noter que la perception des affordances est vue ici uniquement du point de vue des interactions actuelles. Selon cette théorie, face à un objet, une action va être potentialisée par l'environnement au travers de la perception d'affordance. Il est alors postulé que ces dernières sont constantes pour les individus aux mêmes caractéristiques morphologiques et physiologiques. On ne prend donc pas en considération les conséquences d'actions, issues des apprentissages individuels ni des traits individuels (personnalités, intentions...). En effet, si nos actions futures, par le biais de nos intentions, semblent capables d'influencer nos jugements perceptifs, il semble que seule la prise en compte des informations contenues dans le champ d'information ambiant ne suffit pas à expliquer de tels effets. Da Silva et al. (2021) ont notamment mis en évidence l'influence des premières affordances individu-objet perçues sur la perception de la catégorie d'un objet lors d'un changement dynamique de celui-ci, créant une ambiguïté (voir figure 4). Cela relèverait de la tendance à utiliser nos précédentes interactions afin de conditionner nos interactions actuelles, modifiant les affordances perceptibles associées. D'autres études ont également mis en évidence la limite à considérer uniquement la relation acteur-environnement actuelle pour conditionner la perception et orienter l'action (par ex., Ye, Cardwell, & Mark, 2009 ; Rietveld & Kiverstein, 2014 ; Stoffregen, 2003, 2004).

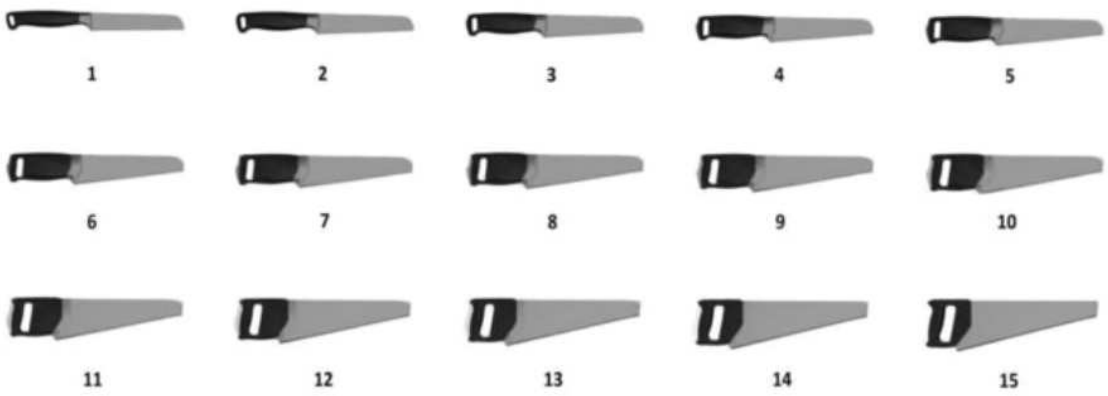

FIGURE 4 – Exemple de série de changement dynamique, un couteau à pain se transforme progressivement en scie. D'après Da Silva et al. (2021).

Il convient donc de présenter comment les associations actions-conséquences apprises de nos précédentes interactions vont pouvoir conditionner nos actions actuelles et orienter nos actions futures.

1.1.2 La théorie idéomotrice

Selon la théorie idéomotrice, issue des travaux de James (1890), les conséquences de nos actions jouent un rôle important dans la sélection des actions. L'association préalable action-conséquence va donc être essentielle pour produire une intention d'action grâce à la capacité de prédire une conséquence. En effet, l'activation d'une conséquence désirée va servir de stimulus pour générer une action (voir figure 5).

La théorie propose que ces associations soient apprises par un mécanisme associatif idéomoteur et intégrées sous forme d'évènements en mémoire, appelés fichier d'évènement (Hommel, Müsseler, Aschersleben, & Prinz, 2001) ou traces mnésiques (Versace et al., 2014), représentant l'ensemble de l'expérience vécue. Ces associations apprises lors des interactions passées permettraient une réactivation de l'ensemble des éléments d'une trace mnésique présentant au moins une caractéristique associée à la situation actuelle (Hommel, 2009). La réalisation et sélection de nos futures actions va passer par cette anticipation des conséquences désirées selon nos intentions. Ce processus d'intégration multimodale a ainsi été proposé afin de comprendre l'aspect unifié des dimensions sensorielles et motrices lorsqu'un individu interagit (par ex., Camus, Brouillet, & Brunel, 2016 ; Corveleyn, López-Moliner, & Coello, 2012).

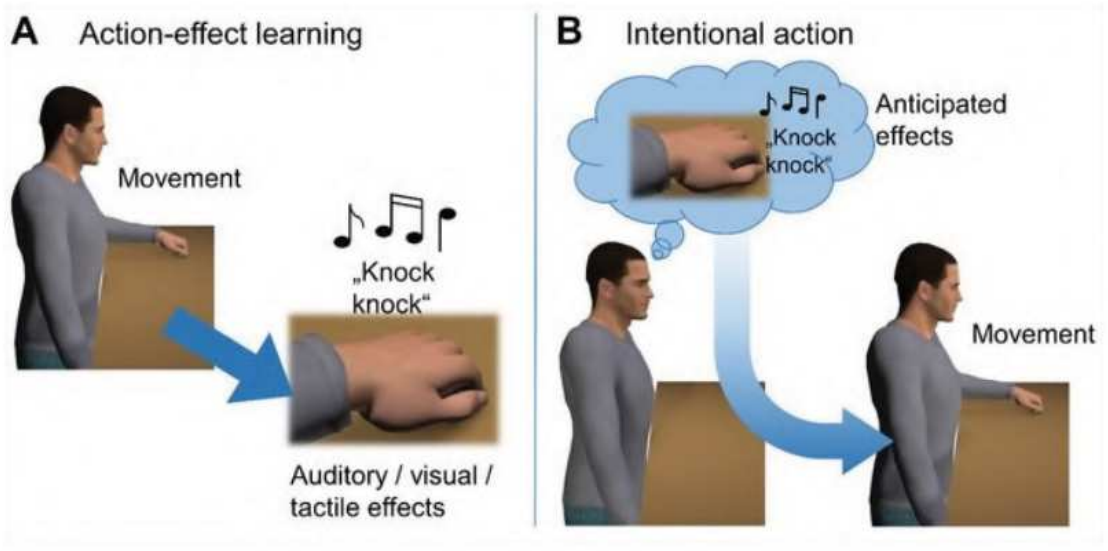

FIGURE 5 – Principe d'association idéomotrice entre un mouvement, ici un coup sur la table, et ses conséquences perceptives. L'apprentissage action-conséquence (A) crée une association bidirectionnelle, qui va permettre la sélection de l'action correspondante selon l'anticipation de la conséquence désirée (B).

Une façon expérimentale de tester le mécanisme associatif idéomoteur consiste à présenter comme stimuli une conséquence préalablement associée (ou apprises) à une action, et à tester quelles actions ces conséquences pourraient déclencher. Cette configuration expérimentale a été utilisée dans des études démontrant que la présentation d'une conséquence d'action préalablement apprise produisait des actions plus précises et plus rapides lorsque la réponse sélectionnée était celle associée à la conséquence (Hommel, 1996 ; Elsner & Hommel, 2001). Ces associations entre les activations motrices (action) et le retour sensoriel (conséquence) sont bidirectionnelles, ce qui signifie qu'activer un schéma d'action consisterait à réactiver la conséquence sensorielle de l'action, ce qui amorcerait l'action correspondante et générerait une intention. De ce fait, les affordances dépendraient, au moins en partie, des associations actions-conséquences apprises préalablement et non plus uniquement de la situation actuelle.

Selon Kunde (2001) et Koch (2002), il est également essentiel de montrer que ces conséquences sont anticipées même si elles ne sont pas préalablement associées à l'action. Le protocole est basé sur l'hypothèse que la relation entre les actions et leurs conséquences puissent être compatibles ou non. Il va alors être similaire au protocole mesurant les affordances, mais en s'intéressant aux relations action-conséquence et non stimuli-action. Si les conséquences de l'action sont réellement anticipées lors de la sélection de l'action, alors elles devraient influencer celles-ci selon leurs compatibilités ou incompatibilités. Les résultats de Kunde (2001) confirment cette hypothèse et montrent que les caractéristiques des conséquences de l'action influencent la sélection de l'action, sans phase d'apprentissage. Cet effet de compatibilité action-conséquence a été reproduit avec des caractéristiques abstraites. L'étude de Koch (2002) a montré des effets similaires de compatibilité en utilisant le sens des mots (par ex., le nom d'une couleur et la couleur d'affichage d'une conséquence). Ces résultats mettent en avant l'importance de l'anticipation dans la sélection de l'action.

De surcroît, une récente étude de Camus, Hommel, Brunel, et Brouillet (2018) a intégré les raisonnements qui sous-tendent l'étude de Kunde (2001) ainsi que celle de Elsner et Hommel (2001). Celle-ci était divisée en deux parties : une phase d'acquisition manipulant les conséquences des actions de réponse puis une phase manipulant la compatibilité de la réponse lors d'une tâche de catégorisation.

Dans la première phase, les participants devaient répondre par une action (préhension de précision ou de force) selon un stimulus présenté (un carré ou un rond). L'intérêt réside dans les conséquences de cette action qui, bien qu'étant inutiles pour sélectionner l'action, pouvaient être compatibles (image d'un petit objet après une préhension de précision) ou incompatibles (image d'un objet large après une préhension de précision) avec l'action.

Leurs résultats montrent que les participants ayant eu systématiquement des conséquences incompatibles avaient des temps de réponse plus longs par rapport aux participants ayant eu des conséquences compatibles. Cela suggère, comme montré préalablement dans les travaux de Kunde (2001), que les individus anticipent les conséquences apprises de leurs actions lors de la réalisation de cette action, ce qui entraîne une interférence dans le cas de conséquences incompatibles ou incohérentes. Fournissant de nouvelles preuves quant à l'activation des associations action-conséquences pendant la sélection de l'action, cette étude permet également de fournir des preuves quant à l'intégration effective de ces associations en traces mnésiques durables.

La seconde phase consistait à catégoriser des objets ("naturel" ou "artificiel") dont la forme pouvait être compatible ou non avec la réponse (petit objet et préhension de précision). Reprenant le paradigme de mesure d'affordance développée par Tucker et Ellis (2001), les résultats montrent que la taille de cet effet de compatibilité varie en fonction de ses associations apprises dans la phase d'acquisition. On retrouve une diminution significative des temps de réponse pour catégoriser un objet, selon sa compatibilité, pour les participants ayant eu des associations action-conséquence compatibles dans la phase d'acquisition et non dans le cas d'associations incompatibles. Les associations de la phase d'acquisition ayant eu des effets sur cette deuxième phase, les résultats sont cohérents avec l'hypothèse d'une intégration en trace mnésique durable. Également, les résultats indiquent que la potentialisation d'une action (ou affordance) est liée à la réalisation préalable de l'action dont on a construit une trace mnésique avec les conséquences d'action. Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle les associations action-conséquences conduisent à l'intégration de traces mnésiques durables, utilisées notamment lors de la sélection des actions, répondant aux prédictions préalablement apprises. De plus, cette théorie a reçu un fort soutien empirique à partir de données neurologiques puisqu'il a été découvert l'existence de neurones, appelés "neurones miroirs", qui s'activent lors de l'observation d'objets dont les caractéristiques et les interactions possibles sont liées au type d'action que ces mêmes neurones codent sur le plan moteur. Leur activation n'est pas corrélée directement à un mouvement (par ex., tendre le bras), mais à une action (par ex., attraper un objet). L'intention est donc essentielle dans son activation et non les paramètres de son mouvement (par ex., la force ou la direction - Gallese & Lakoff, 2005 ; Rizzolatti & Craighero, 2004).

En résumé, ces études permettent de soutenir la théorie idéomotrice selon laquelle les conséquences de nos actions, issues d'apprentissages sensorimoteurs antérieurs, jouent un rôle essentiel dans la sélection des actions en cours. Intégrée au travers de traces mnésiques représentant l'expérience vécue, cette expérience va pouvoir influencer nos comportements actuels et futurs ainsi que notre perception de l'environnement. Nos interactions sont

intégrées par un apprentissage sensorimoteur afin de générer des intentions et orienter nos comportements. Cependant, au-delà de cet aspect sensorimoteur, nous allons voir qu'elles sont le fondement de nos connaissances abstraites.

1.1.3 La théorie constructiviste

Comme nous venons de le voir, la perception et l'action sont interdépendantes et n'auront de sens qu'au regard de l'environnement où elles se situent et des caractéristiques de l'organisme qu'elles habitent. L'information nécessite d'être activement recherchée afin de pouvoir réagir de manière adaptée. Elle va dépendre de l'ensemble des composantes des intéractions présentes, mais également passées. Les associations entre actions motrices et conséquences sensorielles constituent une expérience sensorimotrice. Décrit par la théorie idéomotrice, un principe d'intégration de ces associations sensorimotrices, en traces mnésiques, permet d'orienter la réalisation et la sélection des futures actions selon les conséquences désirées, ou intentions. Les conséquences associées à un objet, par exemple, vont servir à définir la perception de celui-ci par un individu en orientant ses interactions avec lui, ou affordances, et en fournissant une base pour prédire les conséquences des actions possibles avec lui. C'est ainsi qu'un ensemble d'interaction avec un certain objet ou un autre fonctionnellement similaire, va pouvoir structurer des traces mnésiques et former certaines dispositions de l'individu ou façon de voir le monde. La cognition peut être alors définie comme émergente, permettant une coordination de l'ensemble des traces mnésiques pour une adaptation fonctionnelle de l'individu à son environnement.

La théorie constructiviste de l'apprentissage va se fonder sur cette perspective de la cognition humaine pour offrir de nouvelles façons de conceptualiser l'apprentissage, la connaissance et le raisonnement, comme prenant racine sur des activités sensorimotrices (Bada & Olusegun, 2015 ; Fosnot & Perry, 1996). Cette théorie a été notamment développée au milieu du 20ème siècle par différents philosophes, éducateurs et universitaires. Elle occupe aujourd'hui une place importante dans les théories d'apprentissage (Kintsch, 2009), malgré certaines critiques sur son applicabilité dans les pratiques d'enseignement (Tobias & Duffy, 2009). Bien que différentes approches existent, un ensemble de principes communs peut être considéré comme la théorie constructiviste générale. Cette théorie considère que les apprenants génèrent de nouvelles connaissances et une nouvelle compréhension en s'appuyant sur des expériences antérieures, et que les interactions entre les expériences et les nouvelles informations servent à la construction des connaissances (Dewey, 1986 ; Piaget & Cook, 1952 ; Vygotsky, 1978 ; Bruner et al., 1966 ; von Glasersfeld, 1989). Le constructivisme soutient que l'ensemble des expériences et des connaissances antérieures de chaque individu est différent et unique, et donc que la construction des connaissances est différente pour chaque individu. D'un point de vue épistémologique, la

connaissance n'est pas vue comme une représentation de la réalité, mais plutôt comme le résultat des expériences d'un individu face à cette réalité. Par conséquent, la connaissance n'est pas une réalité externe et objective, mais un processus qui inclut l'action elle-même. C'est en faisant des déductions à partir des expériences que l'on construit le vrai et le faux sur le monde. L'expérience joue donc un rôle central dans le processus d'acquisition de connaissance, au travers des actions de l'apprenant. De plus, le constructivisme social (Vygotsky, 1978), une branche du constructivisme, souligne l'importance des contextes socioculturels de l'apprentissage et du rôle de l'enseignant en tant que mécanisme de soutien et d'orientation. Les apprenants peuvent alors accomplir des tâches qu'ils ne pourraient pas accomplir seuls, bénéficiant de conseil ou du guidage nécessaire ou encore s'ils collaborent avec leurs pairs. Il s'agit d'un pas important dans la conception pédagogique, car il souligne l'importance des opportunités d'apprentissage.

Ainsi, à partir de ces activités sensorimotrices, les apprenants construisent différentes formes de connaissances (Briglia, Servajean, Michalland, Brunel, & Brouillet, 2018 ; Versace et al., 2014). C'est pourquoi il est important de permettre aux individus d'interagir avec des matériaux, de manipuler des variables, d'explorer des phénomènes et de tenter d'appliquer des connaissances qui leur donneraient l'occasion de remarquer des similarités et de faciliter l'émergence de connaissances ou règles abstraites (Nosofsky, Palmeri, & McKinley, 1994). Cependant, le développement d'une connaissance abstraite, adaptée au traitement en cours, ne se produit pas spontanément pour les apprenants (Bussi & Mariotti, 2008). Ils doivent établir une similarité entre l'activité et leurs expériences antérieures sur les caractéristiques appropriées (Nosofsky, 1992). La conception des activités et les caractéristiques individuelles doivent être prises en compte pour que les individus puissent établir cette similarité, car des interactions non guidées, ou inadaptées à l'individu, pourraient conduire à une surcharge cognitive ou à une incapacité à créer des similarités entre les situations (par ex., Kirschner, Sweller, & Clark, 2006 ; Alfieri, Brooks, Aldrich, & Tenenbaum, 2011).

De multiples approches, fondées sur cette approche constructiviste, visent à expliquer et à améliorer l'apprentissage. Nous ne citons que deux des plus utilisées, à savoir l'apprentissage expérientiel (Kolb & Kolb, 2017) et l'apprentissage par découverte (Bruner, 1961). Bien qu'il existe de nombreuses définitions dans la littérature, dans leurs formes les plus basiques, elles consistent en un apprentissage qui a lieu dans des situations de résolution de problèmes. Dans celles-ci, les apprenants interagissent avec leur environnement en explorant et en manipulant des objets pour en tirer leur propre expérience et connaissance.

L'apprentissage par découverte se concentre davantage sur les limites de l'exploration dans le cadre de l'activité et de son matériel. Il fournit différents conseils et guidages, de minimes à intensifs, en fonction de la difficulté à construire les connaissances cibles, qui peuvent prendre de nombreuses formes (par ex., des manuels, des simulations, des retours d'information, des exemples de problèmes). Alors que l'apprentissage expérientiel se concentre sur le processus récursif de construction et de transformation de l'apprentissage par une réflexion systématique sur les expériences. Les apprenants peuvent réfléchir et établir des liens avec leurs expériences et connaissances antérieures et superposent ou "construisent" de nouvelles connaissances. En effet, rencontrer une situation nouvelle nécessite qu'elle soit réconciliée avec les connaissances et expériences précédentes, ce qui peut amener à changer les croyances ou à rejeter la nouvelle information, jugée non pertinente. De plus, toutes les expériences ne se valent pas pour apprendre. Les expériences qui empêchent l'acquisition d'expériences alternatives peuvent être contre-productives. Elles peuvent limiter l'acquisition de futures expériences ou de pouvoir les relier aux précédentes afin de les enrichir. Aussi, certaines expériences sont tellement distinctes les unes des autres qu'il devient impossible d'établir un quelconque lien. Il est important que chaque expérience doive acquérir quelque chose de celles qui l'ont précédée et, d'une certaine manière, modifier les attributs de celles qui la suivent (Dewey, 1986).

L'une des contributions les plus importantes de cette théorie est l'approche "centrée sur l'apprenant", s'opposant à une approche "centrée sur le contenu" de l'apprentissage. L'enseignant est donc vu comme un guide, un facilitateur et un co-explorateur qui encourage les apprenants à remettre en question, à contester et à formuler leurs propres idées, opinions et conclusions. Il doit pour cela fournir à l'apprenant des opportunités et des incitations pour qu'il construise ses connaissances et les relie entre elles (Von Glasersfeld, 2005). Tandis que l'approche cognitiviste, dite "traditionnelle", considère l'apprentissage comme reposant essentiellement sur une manipulation de connaissance abstraite par des processus d'inférence. À l'inverse, l'approche constructiviste le considère comme émergent des interactions sensorimotrices. Cette dernière permet de définir l'apprentissage de façon fonctionnelle, comme les changements dans le comportement d'un individu résultant de régularités perçues dans l'environnement de cet organisme (De Houwer et al., 2013). Le comportement englobe toutes les réponses observables d'un individu, qu'il s'agisse d'un mouvement, d'une réponse physiologique ou de pensée (Chiesa, 1994). Les comportements sont considérés comme des réponses à l'environnement, liées à la présence anticipée, actuelle ou passée de certains stimuli environnementaux. Par conséquent, un changement de comportement correspond à un changement de la réponse de l'individu lorsqu'il est ou a été présent dans un certain environnement. Les régularités de l'environnement font référence à la présence soit de plusieurs stimuli à un moment donné ou un stimulus répété. Il est important de noter que le comportement lui-même peut faire partie de ces régularités.

L'apprentissage va être basé sur un processus d'adaptation, lorsque l'on traite de nouvelles informations pour les intégrer à notre mémoire (Kalina & Powell, 2009). Cette adaptation, ou changement de comportement, de l'individu peut être définie selon des processus d'assimilation et d'accommodation (Piaget & Cook, 1952). On parlera ici d'assimilation lorsqu'on associe une nouvelle trace à certaines déjà présente, par similarités, et d'accommodation lorsqu'on modifie des traces existantes, ou leurs traitements, afin d'intégrer une nouvelle trace, ou connaissance. L'apprentissage ne consiste pas à acquérir des connaissances abstraites prédéfinies, mais d'une capacité d'abstraction à partir d'expérience sensorimotrice. La construction du sensorimoteur est à l'origine de la capacité à penser son environnement et soi-même. L'important dans la connaissance, ce n'est pas l'action prise isolément, mais sa capacité à être adaptable à d'autres situations. Cette adaptation est une forme d'abstraction à même de construire une connaissance plus abstraite. Autrement dit, les connaissances abstraites, ou structures cognitives émergent selon la récurrence des similitudes lors de l'activité sensorimotrice.

1.1.4 Modèles de construction d'une connaissance abstraite

Comme nous l'avons discuté, les connaissances abstraites prennent racine dans des activités sensorimotrices. Pourtant, sur la base de ces activités, un mécanisme d'abstraction est nécessaire pour faire émerger des connaissances abstraites. Il s'agit d'un processus essentiel dans l'apprentissage, en permettant la catégorisation, la généralisation et le transfert de connaissances (Lambon Ralph & Patterson, 2008). Dans une perspective constructiviste, la perception des apprenants s'adapte pour enregistrer les objets et les événements sous forme de traces (Hintzman, 1986 ; Versace et al., 2014), qui sont ensuite réutilisées dans de futures interactions similaires (Goldstone, Landy, & Son, 2008, 2010). Au lieu de considérer les abstractions comme des représentations amodales qui éliminent les aspects perceptifs, ces informations sensorielles sont considérées comme essentielles à l'émergence des connaissances abstraites. Les connaissances émergent par un processus d'appariement global entre une situation donnée et toutes les situations similaires (ou traces mnésiques) que l'individu rencontre (Brunel, Goldstone, Vallet, Riou, & Versace, 2013 ; Brunel, Carvalho, & Goldstone, 2015 ; Brunel, Camus, Rey, & Versace, 2017 ; Briglia et al., 2018). Plus la situation correspond à une grande quantité de traces mnésiques, plus l'abstraction devrait se produire et donc une connaissance abstraite devrait émerger. De la même manière, plus une association peut être riche en modalités lors de l'intégration, plus elle pourra être reliée à d'autres associations préalables ayant des similarités et plus sa saillance mnésique sera forte. C'est le cas par exemple pour un apprentissage actif de phrase, c'est-à-dire avec la réalisation de l'action correspondante à la phrase, entraînant une meilleure mémorisation (Kormi-Nouri & Nilsson, 2001).

L'ajout de modalités motrices semblerait bien aider à la récupération d'événements en mémoire (Engelkamp, 1998, 2001). On retrouve également les effets d'un apprentissage actif en permettant aux individus de générer eux-mêmes la connaissance. Par exemple, dans les tâches de génération d'indices, on a demandé à des sujets de fournir un mot indice lié à chaque mot cible qui lui était présenté (par ex., VOITURE – ———, Mäntylä & Nilsson, 1983). La mémorisation des mots est comparée avec un autre groupe soumis à une simple tâche de lecture de paires de mots (par ex., VOITURE – GARAGE). Les auteurs ont démontré que cet apprentissage actif produit de meilleures performances qu'un apprentissage passif (sans action). D'autres études ont permis de répliquer ces résultats (par ex., Lengenfelder, Chiaravalloti, & DeLuca, 2007 ; Taconnat, Froger, Sacher, & Isingrini, 2008).

On retrouve ce principe au travers de plusieurs modèles sur la mémoire. Par exemple, le modèle MINERVA2 (Hintzman, 1988) considère qu'une trace mnésique est l'enregistrement d'une expérience capturant, parfois de façon imparfaite, l'ensemble des caractéristiques qui la constitue. En outre, chaque expérience induirait la formation d'une trace spécifique en mémoire, conduisant à un système de traces multiples. Pour tester l'apprentissage, un indice de récupération, appelé sonde, peut être présenté en mémoire. La sonde représente une configuration active des propriétés d'une expérience donnée qui va être confrontée à toutes les traces mnésiques. Chaque trace va être activée en fonction de sa similitude avec la sonde, ce qui implique que plus une trace en mémoire partage un grand nombre de propriétés avec celle-ci, plus elle va être activée, et inversement. Ainsi, la confrontation de la sonde avec l'ensemble des traces mnésiques produit un écho, somme des activations, qui correspond à la réponse du modèle (action). Plus l'intensité de l'écho est élevée, plus la mémoire est globalement activée et, donc, plus l'information présentée peut être considérée comme familière (voir figure 6).

Basé sur ce principe, un récent modèle de mémoire, ATHENA (Briglia et al., 2018), va plus loin encore en proposant de ne plus considérer directement l'intégration de trace mnésique, mais plutôt le traitement mnésique. Toutes les traces mnésiques se modifient en parallèle selon la manière dont elles traitent l'information et construisent une nouvelle trace. Il en résulte une interdépendance des traces capable de se souvenir des similitudes des éléments qui les composent et donc des processus mnésiques de manière récursive. Selon une approche similaire, le modèle de mémoire ACT-IN (Versace et al., 2014) propose également que le caractère épisodique ou sémantique d'une connaissance dépende entièrement du mécanisme d'activation de la trace mnésique. Plus précisément, plus une trace sera unique, plus la connaissance qui émerge sera d'ordre épisodique (par ex., un souvenir précis). Inversement, plus il y aura de traces similaires activées, plus la connaissance qui émerge sera abstraite (par ex., une connaissance plus générale). Ainsi, l'abstraction est

une capacité à construire des connaissances abstraites subjectives, adaptées aux besoins actuels d'une action située et émergente de l'ensemble des traces mnésiques associées. Ces modèles permettent de pouvoir émerger de l'abstraction, connaissances plus ou moins abstraites, à partir de traces ayant toutes le même niveau d'abstraction. Il n'y a pas de représentation de l'abstraction. Ce processus est à la base de la construction de connaissance, par un processus d'appariement global.

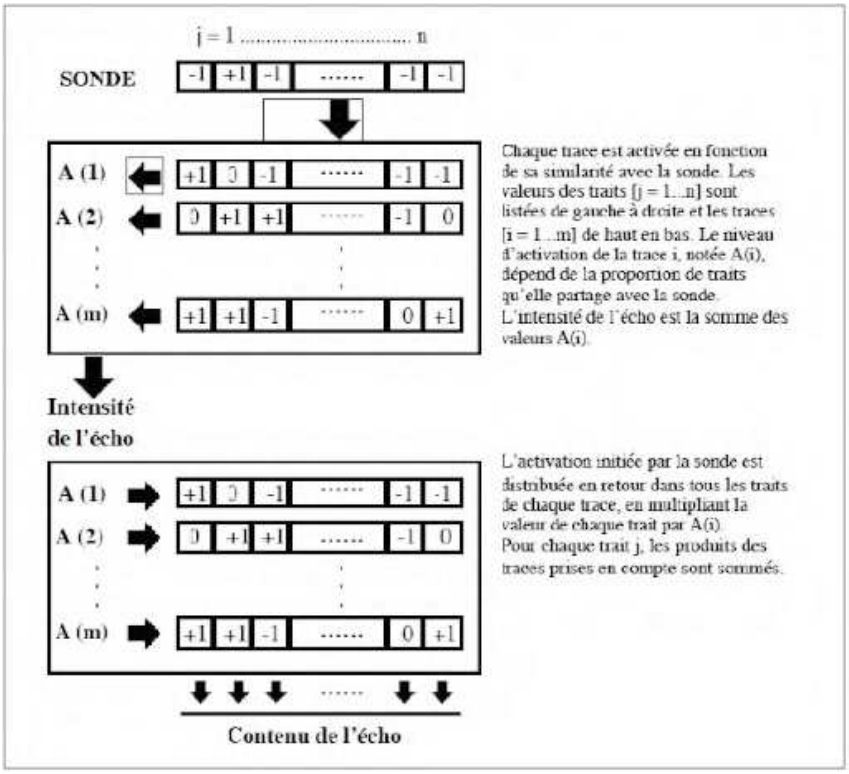

FIGURE 6 – Le modèle à traces multiples MINERVA2 - Issu de Oker (2009).

***

L'apprentissage constructiviste va mettre l'individu au centre, pour lequel il convient de concevoir un environnement propice à des interactions pertinentes et des phases de réflexion, afin de faciliter la construction des connaissances. De plus, nos connaissances changent, parce que notre façon de percevoir et d'agir avec ces connaissances change. Cette notion selon laquelle des interactions sensorimotrices entraînent des adaptations du comportement, et que la conscience joue un rôle d'évaluation ultérieure pour donner un sens à ces changements, est cruciale pour construire une connaissance abstraite à partir d'une interaction guidée par un sentiment de différence. Reprenant les mots de Ginsburg (2010, p. 185) : *«L'apprentissage lui-même n'est pas conscient. Le processus d'intégration lui-même n'est pas conscient. Néanmoins, le processus dépend de processus conscients pour ressentir et détecter les changements. La conséquence est ressentie comme une différence»*. Ainsi, la conscience serait nécessaire pour évaluer rétroactivement nos actions afin de donner un sens aux différences produites par celles-ci.

1.2 La place de l'individu comme agent

Pour une même situation, il nous est possible de la vivre de façon radicalement opposée. Que l'on tombe ou plonge d'une falaise, nous sommes dans une situation identique de chute libre. Pourtant, l'expérience vécue ne sera pas la même au regard du contraste entre une situation subie (tomber) et une situation décidée (plonger). Ce contraste entre "volontaire" et "involontaire" est permis par un sens spécifique, celui de l'agentivité. Ce dernier fait référence à une capacité spécifique de ressentir et construire une distinction entre soi et le monde, servant de fondement à notre conscience de soi. Le sens de l'agentivité permet de se définir comme le « je » à l'origine d'un événement dans le monde et va permettre d'attribuer une origine causale aux événements (Haggard & Chambon, 2012 ; Blakemore & Frith, 2003 ; Haggard, 2005 ; Gallagher, 2007 ; Synofzik, Vosgerau, & Newen, 2008). Cette partie s'intéressera à définir ses mécanismes, au travers de trois approches ainsi que de ses outils de mesure. Ceci nous permettant d'ouvrir sur ses intérêts à la prendre en compte pour l'apprentissage.

1.2.1 Les approches du sens de l'agentivité

Afin de définir l'agentivité, plusieurs approches différentes ont été développées. Alors que pour certains, les processus précédant l'exécution de l'action sont le fondement de toute expérience d'agentivité, d'autres mettent davantage l'accent sur les processus suivant l'action. Cette distinction ne doit pas être considérée comme une dichotomie absolue, mais plutôt comme deux extrêmes d'un continuum permettant de catégoriser deux approches opposées sur l'agentivité, l'approche prédictive et postdictive. Pourtant, des preuves de plus en plus croissantes montrent que ces processus contribuent chacun à l'agentivité (pour une discussion plus approfondie, voir Wegner & Sparrow, 2004), amenant au développement d'une nouvelle approche, dite intégrative, unifiant les précédentes approches. Après une présentation des approches prédictive et postdictive avec leurs limites, nous verrons pourquoi l'approche intégrative est utile et servira de base pour les travaux de cette thèse.

1.2.1.1 Approche prédictive

Selon l'approche prédictive, orientée sur les processus précédant l'exécution de l'action, l'agentivité serait déduite suivant la comparaison entre les conséquences sensorielles prédites et observées. Afin de développer cette approche, nous présenterons son principal modèle, le modèle du comparateur (ou Comparator Model).

Il a été originalement conçu comme un modèle sur l'apprentissage et le contrôle moteur (Wolpert & Ghahramani, 2000). Il s'est révélé être un premier modèle intéressant pour l'étude du sens de l'agentivité (Frith, Blakemore, & Wolpert, 2000 ; Blakemore, Wolpert, & Frith, 2002). Selon ce modèle, le système moteur repose d'abord sur un processus de sélection de l'action initiée par nos intentions. Cette sélection de l'action va permettre l'envoi de commandes motrices pour modifier l'état du système moteur et produire le retour d'information sensomotrices attendue. Il reprend donc le principe idéomoteur, mais précise qu'une copie de ces commandes motrices (appelée copie efférente) va en parallèle alimenter un processus prédictif afin de générer des prédictions quant aux conséquences de l'action à réaliser. Ainsi, après avoir réalisé l'action, une comparaison est faite entre les conséquences prédites et celles perçues afin de déterminer l'agentivité. Une correspondance amènera à ce que l'action soit expérimentée comme initiée par l'individu. Tandis qu'une absence de correspondance amènera à ce que l'action soit expérimentée comme initiée par des causes externes à l'individu (voir figure 7).

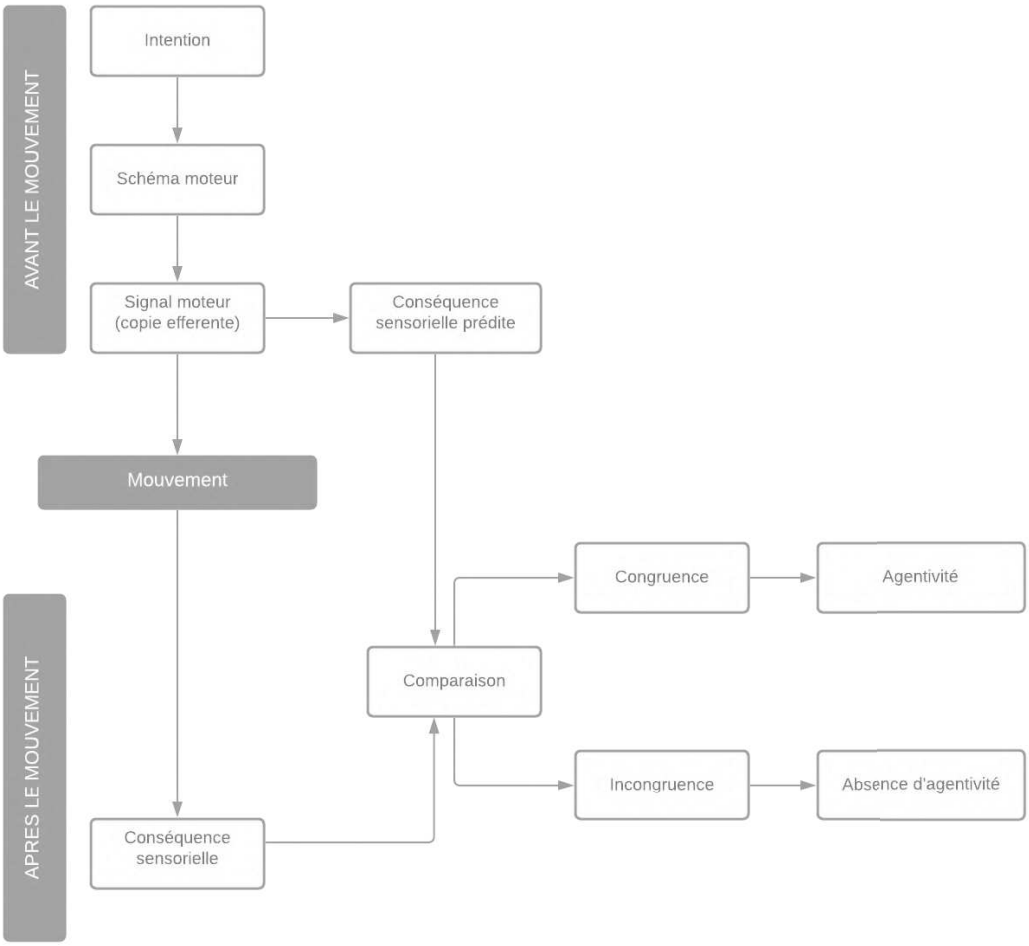

FIGURE 7 – Aperçu schématique du *Comparator Model* (adapté de David et al., 2008).

Également, il est important de noter que cette approche ne considère pas l'agentivité comme purement issue de processus prédictif, car elle nécessite un retour sensoriel de l'action (et donc un traitement après l'action, ou postdictif) pour la comparaison. Cependant, le processus prédictif est essentiel tandis que les caractéristiques des conséquences (le retour sensoriel) ne sont pertinentes qu'en tant que point de comparaison, elles n'apportent pas directement d'information importante pour l'émergence de l'agentivité. Cette dernière dépend de la validité des prédictions faites sur les conséquences de l'action, elle sera d'autant plus forte lorsque la prédiction et l'observation d'une conséquence correspondront.

L'explication apportée par ce modèle sur l'émergence de l'agentivité bénéficie de preuves empiriques considérables de la part d'études comportementales et neuropsychologiques (par ex., Voss, Ingram, Haggard, & Wolpert, 2006 ; David et al., 2008). Le plan expérimental généralement mis en œuvre pour tester ces hypothèses consiste à insérer des décalages spatiaux (par ex., Fourneret & Jeannerod, 1998 ; Farrer et al., 2003 ; Synofzik, Thier, & Lindner, 2006) ou temporels (par ex., Leube et al., 2003 ; MacDonald & Paus, 2003) entre une action et ses conséquences sensorielles. Dans l'ensemble, ces études ont démontré que l'agentivité est progressivement réduite lorsque les divergences temporelles ou spatiales augmentent. Ainsi, l'accent principal est mis sur les processus sensorimoteurs prédictifs, contrairement à l'approche postdictive de l'agentivité, mettant en avant les inférences postdictives.

1.2.1.2 Approche postdictive

Selon l'approche postdictive, l'agentivité serait le produit d'une inférence post-hoc faillible pendant et après l'action, plutôt que comme le résultat d'un accès direct infaillible aux processus de préparation cognitive et motrice précédant l'action. Afin de développer cette approche, nous présenterons son principal modèle, le modèle issu de la théorie de la causalité mentale apparente (ou Apparent Mental Causation Theory).

Ce modèle de la causalité mentale apparente montre que l'expérience de l'agentivité (appelé ici volonté consciente) émerge quand un individu infère un lien de causalité entre une intention d'agir (appelé ici une pensée) et une action. Toutefois, ce lien dépendra de ce dont il aura conscience (Wegner & Wheatley, 1999 ; Wegner, 2003). Les intentions et actions sont causées par des voies inconscientes distinctes, pouvant être reliées ensemble de façon également inconsciente. Les vrais liens de causalités sont inaccessibles à la conscience de l'individu (voir figure 8). Le sens de l'agentivité est vu comme le résultat d'une inférence de causalité apparente et non réelle.

Partant ainsi du postulat que les informations motrices ne sont pas accessibles consciemment, l'approche postdictive considère qu'un individu doit utiliser des inférences afin d'attribuer la cause d'une conséquence. De façon similaire au modèle du comparateur, si les conséquences de notre action correspondent à celles prédites par nos intentions, une agentivité sera produite. Cela implique que certains mécanismes prédictifs soient utilisés, tels que les commandes motrices, mais ils ont ici une faible influence sur l'agentivité (par ex., Linser & Goschke, 2007). Cependant, les intentions dépendent très peu du système moteur et de l'exécution de l'action. C'est la correspondance entre les intentions conscientes et les conséquences observées de l'action qui permet, rétrospectivement, d'inférer une agentivité sur ces conséquences.

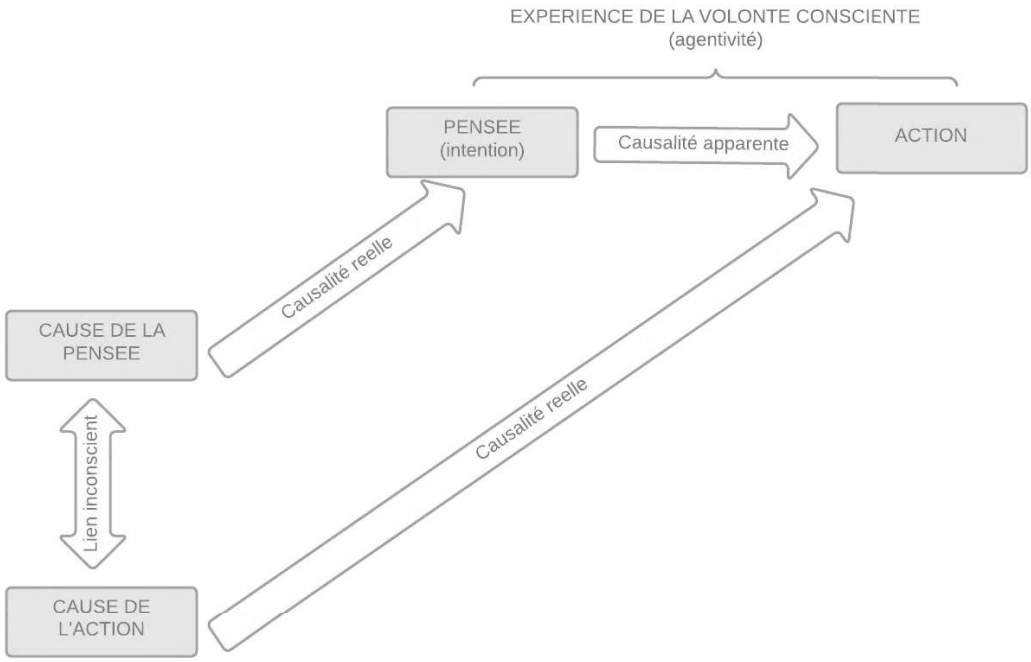

FIGURE 8 – Aperçu schématique : Le *Apparent Mental Causation Theory* (adapté de Wegner & Wheatley, 1999).

Ce modèle propose trois principes fondamentaux, permettant d'inférer sur ce lien de causalité. L'inférence postdictive de l'agentivité se fait par degrés, selon le respect de ces principes :

- **Principe de priorité** : Une intention d'agir doit avoir été formée juste avant que l'action ne soit exécutée. C'est-à-dire que l'intention doit apparaître dans un laps de temps suffisamment court avant que l'action ne soit réellement exécutée. La temporalité entre une intention et une action s'avère être un facteur crucial de l'agentivité. On considère qu'un délai inférieur à 1 seconde entre la formation de l'intention et la génération de l'action permet la plus forte expérience d'agentivité (Wegner & Wheatley, 1999). Néanmoins, il serait possible de s'attribuer une action a posteriori, en formant une intention après que l'action se soit produite (Wegner, 2003). ;
- **Principe de cohérence** : La cohérence repose sur la comparaison sémantique entre l'intention d'agir et l'action effectuée. Il doit y avoir une relation entre la pensée (l'intention) précédant une action et la perception de l'action (relation sémantique, associative, émotionnelle...). Le mécanisme qui détermine la contribution du principe de cohérence de l'agentivité repose sur la force relationnelle entre la pensée et l'action.
- **Principe d'exclusivité** : L'intention doit expliquer exclusivement l'action. Il ne devrait y avoir aucune autre explication prédominante disponible qui expliquerait l'action et écarterait toute intention, si elle est présente, comme une cause de l'action. Il s'agirait d'un mécanisme de pondération des diverses causes possibles de l'action. Une cause sera perçue comme moins influente si d'autres causes possibles sont perçues par l'individu (Ahn & Bailenson, 1996 ; Wegner, 2003).

Un certain nombre d'études soutiennent cette approche (par ex., Pronin, Wegner, McCarthy, & Rodriguez, 2006 ; Wegner, Sparrow, & Winerman, 2004 ; Johansson, Hall, Sikström, & Olsson, 2005). Par exemple, le fait d'induire une intention auprès du participant sur les conséquences d'une action peut permettre de générer une agentivité sans action (Wegner et al., 2004). En l'espèce, les participants se regardaient dans un miroir tandis qu'une autre personne, cachée derrière eux, tendait ses bras afin de "remplacer" visuellement ceux du participant. Les mains effectuent des mouvements, pour lesquels le participant pouvait entendre les instructions permettant de prédire les mouvements. Le fait d'entendre les instructions a permis de générer une agentivité pour le participant, malgré l'absence d'action. Par cette approche, l'agentivité serait générée lorsque les événements extérieurs suivent de façon cohérente nos intentions ou pensées, au travers de traitements postdictifs centrés sur les indices cognitifs, sensoriels et contextuels, tels que les pensées, croyances et l'appariement sémantique intention-conséquence.

1.2.1.3 Limites de l'approche prédictive et postdictive

Comme nous le détaillerons par l'approche intégrative, il est possible de distinguer deux niveaux du sens de l'agentivité : d'une part, le sentiment d'agentivité qui consiste en un enregistrement sensorimoteur automatique d'être, ou non, l'agent d'une situation. D'autre part, le jugement d'agentivité, qui est la formation d'une croyance sur l'identité de l'initiateur du mouvement (Synofzik et al., 2008 ; Synofzik, Vosgerau, & Voss, 2013). Tandis que le sentiment va influencer la perception d'une action ou d'un événement sensoriel particulier pour marquer l'agentivité, le jugement va s'établir (en fonction des exigences du contexte) en prenant en compte non seulement ce sentiment mais aussi les informations contextuelles, les croyances, les normes sociales générales, etc. (voir figure 8).

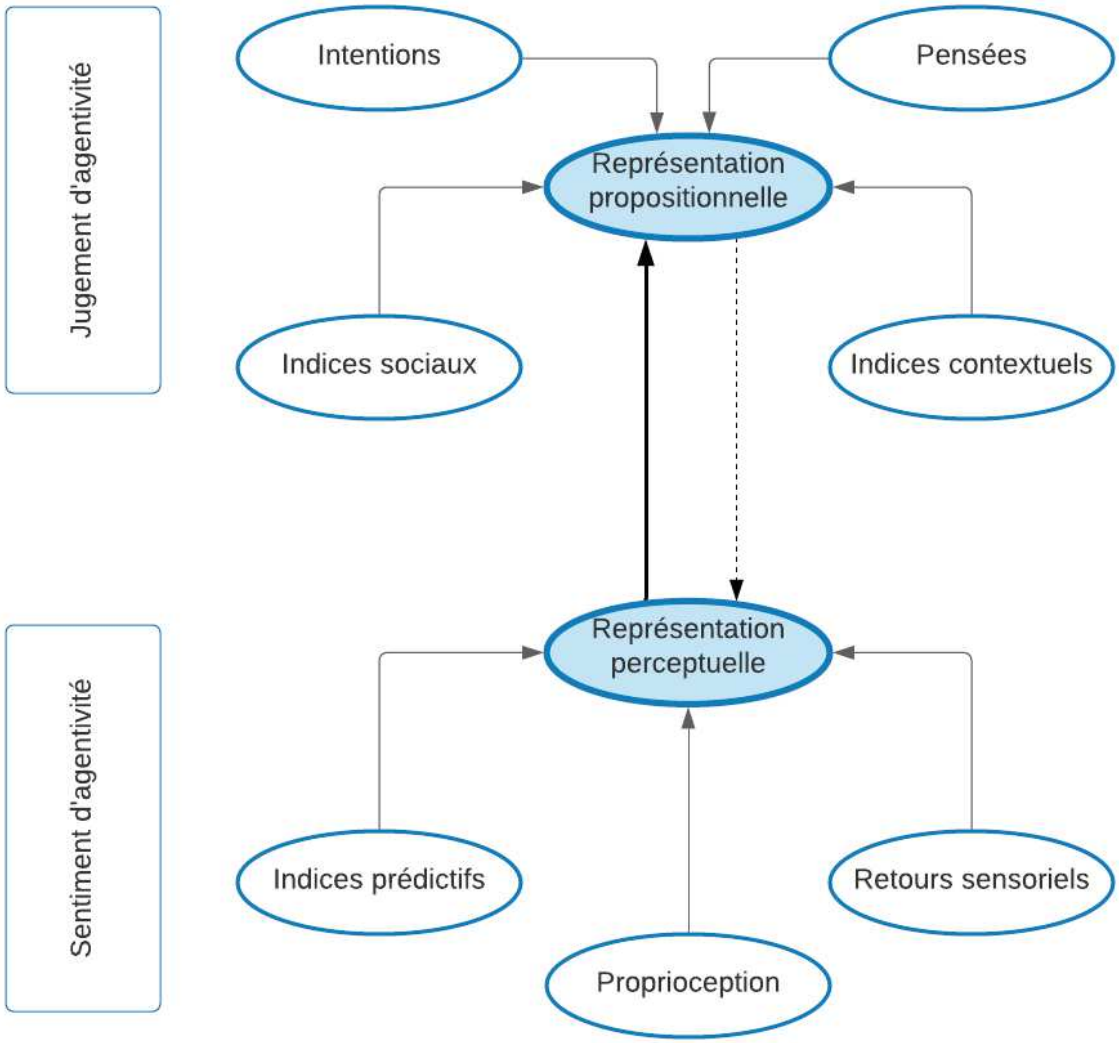

FIGURE 9 – Aperçu schématique : Le *Two-Step Account* (adapté de Synofzik et al., 2008).

Ainsi, d'un côté l'approche prédictive, basée sur des indices internes (copie efférente), peut expliquer le sentiment d'agentivité. Cependant, elle ne peut pas expliquer l'attribution consciente de l'origine d'une action, autrement dit le jugement d'agentivité, qui ne dépend pas uniquement des processus sensorimoteurs, mais nécessite l'intégration d'indices contextuels, de la prise en compte des croyances et d'inférences post-hoc. De plus, elle ne permet pas d'expliquer certains aspects du niveau sensorimoteur de l'agentivité. Par exemple, les résultats de l'étude de Wilke, Synofzik, et Lindner (2012) montrent que la valence des conséquences de nos actions, positive ou négative, module le sentiment d'agentivité, contrairement à l'hypothèse de l'approche prédictive. Les participants percevant leurs mouvements comme dirigés vers les conséquences positives et éloignés des conséquences négatives.

De l'autre, l'approche postdictive s'oriente principalement sur les jugements conscients de l'agentivité. Ces jugements pourraient en effet essentiellement reposer sur des inférences post-hoc basées sur des indices cognitifs complexes tels que les attentes sur les conséquences de l'action, les croyances, les interactions sociales et le contexte. Néanmoins, l'approche ne permet pas d'expliquer le sentiment d'agentivité. De plus, elle reste confrontée à plusieurs autres limites. Les processus d'inférence prennent plus de temps, du moins par rapport aux processus prédictifs. L'agentivité résultant d'une reconstruction postérieure à l'action émergerait ainsi très tardivement et ajouterait systématiquement un processus cognitif inférentiel à la perception. Ces retards entraîneraient alors de graves défaillances des systèmes sensorimoteurs qui ont besoin de distinguer en permanence si un événement sensoriel est la conséquence de nos actions ou non. Même un léger retard pourrait conduire à une perception de l'environnement comme instable (Haarmeier, Bunjes, Lindner, Berret, & Thier, 2001 ; Lindner, Thier, Kircher, Haarmeier, & Leube, 2005) ou des informations interférant avec nos interactions (Blakemore, Frith, & Wolpert, 1999). Enfin, l'agentivité risquerait constamment d'être induite en erreur par les événements de l'environnement dus aux hasards, à des absences ou un surplus d'informations perçues, des croyances erronées, des émotions confuses, etc. Ce qui semble peu réaliste au vu de l'efficacité quotidienne de nos attributions causales (Haggard, 2017). Également, la faible influence des informations sensorimotrices, pourtant prouvées robustes et fiables, semble ainsi peu probable.

Ces résultats expérimentaux, impossibles à expliquer par l'une ou l'autre de ces approches, ont conduit au développement d'une nouvelle approche afin de décrire de manière plus exhaustive la complexité du sens de l'agentivité (Synofzik, 2015).

1.2.1.4 Approche intégrative

Cette approche, dite intégrative, propose que les processus prédictifs et postdictifs servent chacun d'indices d'agentivité qui sont continuellement intégrés et pondérés en fonction de leur disponibilité et de leur fiabilité dans une situation donnée. Les indices sensorimoteurs et cognitifs peuvent servir d'indices prédictifs (par ex., les prédictions internes basées sur une copie efférente ou les anticipations cognitives basées sur l'amorçage). D'autres indices sensorimoteurs et cognitifs peuvent également servir d'indices post-hoc (par ex. le retour visuel de l'action ou la valence émotionnelle des conséquences). L'intégration et la pondération de ces indices peuvent varier non seulement d'un contexte à l'autre, mais également d'un individu à l'autre. Permettant de rendre compte de la complexité de l'agentivité, cette approche semble la plus aboutie et parcimonieuse actuellement. Elle servira ainsi de base théorique pour ces travaux de thèse.

Plus particulièrement, nous nous reposerons sur le modèle le plus récent de cette approche, celui issu de la théorie de l'intégration d'indices (Synofzik et al., 2013). Selon lui (voir figure 10), l'agentivité est issue d'une intégration constante de plusieurs indices d'agentivité, qui seraient pondérés en fonction de leur fiabilité relative dans une situation donnée. La fiabilité d'un indice est faible si sa variance est élevée, et à l'inverse, la fiabilité est élevée s'il est présent de manière très saillante ou précise. Cette notion reprend le principe d'intégration optimale des indices établi dans le domaine de la perception des objets. Selon ce dernier, aucun indice d'information unique n'est assez puissant pour transmettre une trace adéquate d'un objet dans toutes les situations possibles. Au contraire, en fonction de la disponibilité et de la fiabilité d'un certain indice d'information, différentes stratégies de combinaison et d'intégration doivent être utilisées pour pondérer les indices sensorimoteurs. Habituellement, les indices efférents prédictifs, tels que les prédictions internes, sont les indices d'agentivité les plus fiables et robustes, car ils fournissent généralement les informations les plus rapides et fidèles sur l'action (Wolpert & Flanagan, 2001). Cependant, selon la situation ou l'individu, ces indices prédictifs peuvent devenir faibles ou imprécis. Dans ce cas, d'autres indices, comme les indices post-hoc, comme les conséquences de l'action recevront un poids plus important pour déterminer l'agentivité. En d'autres termes, la variance d'un indice d'agentivité devrait être directement liée à la confiance accordée à un autre indice. Ainsi, l'intégration optimale des indices pourrait non seulement permettre une perception robuste des objets et du monde (Ernst & Banks, 2002 ; Ernst & Bülthoff, 2004) et un apprentissage sensorimoteur efficace (Körding & Wolpert, 2004), mais aussi constituer le mécanisme fondamental pour générer une agentivité robuste, tout en étant flexible, dans l'ensemble des situations quotidiennes (Synofzik et al., 2013 ; Synofzik, Thier, Leube, Schlotterbeck, & Lindner, 2010 ; Moore, Middleton, Haggard, & Fletcher, 2012).

Dans certaines circonstances stables et sans ambiguïté, le sentiment d'agentivité peut être si fort qu'il ne sera pas nécessaire d'avoir un jugement d'agentivité. Cela sera le cas pour une forte correspondance entre l'ensemble des indices (par ex., se toucher le visage avec sa main, dans un contexte sans ambiguïté - seul, sans gant, etc.). En revanche, dans le cas d'une forte absence de correspondance, cela générera le sentiment de ne pas être la cause de l'action et entraînera un mécanisme d'interprétation des indices (par ex., une manipulation expérimentale sur les conséquences visuelles d'une action). Cette interprétation dépend du contexte, mais également de nos croyances et connaissances sur le monde, les autres et nous-mêmes. Cela aboutit à la formation ou la modification de nos croyances. En d'autres termes : dans la vie de tous les jours, nous n'avons normalement pas besoin de former des croyances et des jugements sur notre agentivité, le sentiment d'agentivité suffit. Mais, plus les conséquences des actions sont ambiguës, externes, arbitraires ou médiatisées (informatiquement ou culturellement), plus l'importance est accordée au mécanisme de formation des croyances.

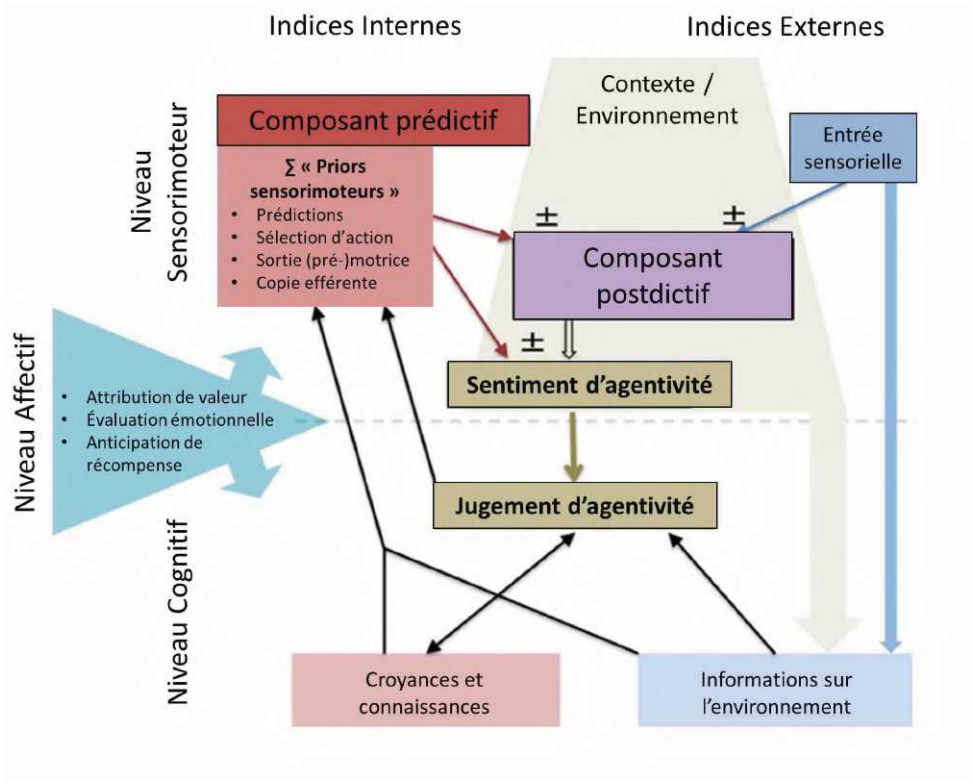

FIGURE 10 – Aperçu schématique : Le modèle *Cue Integration Theory* (adapté de Synofzik et al., 2013).

Le jugement d'agentivité, quant à lui, opère à un niveau cognitif peut être déterminé directement par le sentiment d'agentivité, mais il est également fortement influencé par les indices externes, tels que l'information accessible de l'environnement, et interne, tels que les connaissances ou croyances internes sur le monde. Ces connaissances et croyances étant elles-mêmes influençables par le jugement d'agentivité au travers d'une boucle de rétroaction. De plus, ces indices cognitifs, tels que les connaissances et croyances, incluant le jugement d'agentivité, peuvent modifier les priors sensorimoteurs, par amorçage d'associations automatiques (Aarts, Custers, & Wegner, 2005) ou induction de croyances causales (Desantis, Roussel, & Waszak, 2011) par exemple. En outre, l'appréciation émotionnelle, l'anticipation d'une récompense ou d'une punition ou l'attribution de valeur peuvent influencer la pondération des indices internes ou externes à la fois au niveau sensorimoteur et cognitif (Wilke et al., 2012 ; Yoshie & Haggard, 2013 ; Synofzik et al., 2013).

Ainsi, le sens de l'agentivité est défini comme une pondération d'un grand nombre d'indices sensorimoteurs et cognitifs, interne et externe, au travers de processus prédictifs et de processus postdictifs. Par ce modèle, cette approche semble la plus aboutie et avantageuse par rapport aux approches prédictive et postdictive (Gallagher, 2012).

Malgré tout, elle fait face à diverses limites. En effet, la complexité de prendre en compte l'ensemble de ces indices pour expliquer une agentivité particulière n'a permis, jusqu'à présent, d'apporter que des preuves expérimentales limitées et souvent indirectes pour soutenir cette approche de l'agentivité (Moore, Wegner, & Haggard, 2009 ; Synofzik & Voss, 2010 ; Moore et al., 2012). De plus, l'existence de ces niveaux d'agentivité, ainsi que leurs relations, fait toujours l'objet de débats et d'un nouvelles recherches (David, Stenzel, Schneider, & Engel, 2011 ; Miele, Wager, Mitchell, & Metcalfe, 2011 ; Obhi & Hall, 2011).

1.2.2 Les mesures de l'agentivité

Afin d'étudier au mieux l'agentivité, il est indispensable de développer et d'utiliser des outils de mesure adaptés et validés. Les recherches sur l'agentivité utilisent deux grands types de mesures : d'un côté, des mesures directes des processus cognitifs, et d'un autre, des mesures indirectes (Haggard, 2017).

1.2.2.1 Les mesures actuelles du sens de l'agentivité

• **Les mesures directes du sens de l'agentivité :**
Des jugements dichotomiques et des évaluations par des échelles de Likert sont principalement utilisés pour les mesures directes. Certaines des études ont utilisé des réponses de type vrai-faux pour que le participant indique si le mouvement du curseur sur un écran est attribuable à lui-même ou à une autre personne (Franck et al., 2001 ; Farrer, Bouchereau, Jeannerod, & Franck, 2008). D'autres ont utilisé une échelle d'évaluation de Likert pour déterminer le degré d'accord avec une affirmation telle que "J'ai causé le résultat sensoriel" (Wegner & Wheatley, 1999 ; Sato & Yasuda, 2005).

En général, le participant fait une action, qu'il ne voit pas directement, mais il a accès à un retour d'information par un écran. Ce retour d'information peut reproduire l'action du participant, de façon fidèle ou avec des décalages spatio-temporels, reproduire l'action de quelqu'un ou de quelque chose d'autre (par ex., un expérimentateur ou un ordinateur). Prenons le cas de l'étude de Farrer qui a demandé à des participants d'effectuer des mouvements de tapotement des doigts en portant un gant (Farrer et al., 2008). Ils ne pouvaient pas voir directement les mouvements, mais recevaient un retour vidéo sur l'écran. Un délai temporel était inséré entre le mouvement et la vidéo. Les participants ne savaient pas que le mouvement était toujours le leur, mais ils étaient amenés à croire que le mouvement était soit le leur, soit celui de l'expérimentateur, et qu'il pouvait changer à tout moment.

Les résultats utilisant ce genre de décalages spatiaux ou temporels dans les conséquences sensorielles des mouvements montrent que l'agentivité, mesurée de façon directe, diminue en fonction du degré de décalage spatio-temporel. Il est important de noter que les mesures directes de l'agentivité et la capacité de détection des décalages montrent des fonctions psychométriques distinctes, ce qui suggère que la mesure directe ne reflète pas simplement la détection des décalages, mais bien le sens de l'agentivité (Asai & Tanno, 2007, 2013). Si, ces tâches de reconnaissance ou de surveillance sont orientées sur l'action (le mouvement), il est cependant possible d'utiliser ces mesures orientées sur les conséquences. Les participants indiquent la mesure dans laquelle ils estiment que leurs actions ont provoqué certaines conséquences sensorielles, par exemple une pression sur une touche

qui provoque une tonalité après un délai temporel variable. Les résultats montrent que l'agentivité est plus forte lorsque l'action et la conséquence sont temporellement proches (par ex., Chambon, Moore, & Haggard, 2015).

- **Les mesures indirectes du sens de l'agentivité :**

Les mesures indirectes constituent des outils importants et complémentaires aux mesures directes. Jusqu'à présent, un certain nombre de ces mesures ont été proposées, comme l'analyse de mouvement (Knoblich & Kircher, 2004), l'atténuation sensorielle (Blakemore, Wolpert, & Frith, 1998) et la liaison intentionnelle (Haggard, Clark, & Kalogeras, 2002). L'analyse des mouvements permet de révéler les propriétés sous-jacentes et implicites de nos actions qui ne peuvent pas être rapportées verbalement. Elle peut être utilisée pour démontrer un comportement dirigé vers un but, même en l'absence d'intention consciente (Fourneret & Jeannerod, 1998 ; Knoblich & Kircher, 2004). L'atténuation sensorielle fait référence, quant à elle, au fait que les conséquences des actions volontaires sont caractérisées par une réduction de l'intensité perceptive et des réponses neuronales pour les événements sensoriels initiés par l'individu lui-même (Waszak, Cardoso-Leite, & Hughes, 2012 ; Hughes, Desantis, & Waszak, 2013). Cette conséquence de l'agentivité, issue des prédictions du système moteur, permet notamment d'expliquer pourquoi nous sommes incapables de nous chatouiller nous-mêmes (Blakemore et al., 1998). La liaison intentionnelle fait référence à la compression perçue de l'intervalle de temps entre une action intentionnelle et ses conséquences sensorielles, par rapport à une action involontaire (Moore & Obhi, 2012). Elle peut être mesurée principalement de deux façons : soit, un paradigme de lecture d'horloge (Libet, Wright Jr, & Gleason, 1983), où les participants rapportent la position de l'aiguille sur l'horloge au moment où ils ont appuyé sur la touche ou entendu une tonalité suivant l'appui sur la touche (Haggard et al., 2002) ; soit, un paradigme d'estimation d'intervalle où les participants estiment verbalement l'intervalle temporel entre une action et ses conséquences (Engbert, Wohlschläger, Thomas, & Haggard, 2007). L'ampleur de l'effet est considérée comme un indicateur du degré d'agentivité (Caspar, Christensen, Cleeremans, & Haggard, 2016 ; Imaizumi & Tanno, 2019). Il a été démontré que ces mesures indirectes reflètent bien l'agentivité, notamment données sur les processus sensorimoteurs (pour une revue, voir Waszak et al., 2012 ; Moore & Obhi, 2012).

1.2.2.2 Les limites des mesures actuelles et l'intérêt d'une mesure globale

- **Les limites :**

Dans l'ensemble, les mesures directes sont difficiles à interpréter et renvoient à certaines limites. En effet, il est bien connu en psychologie sociale que les demandes explicites sont sensibles à différents biais, tels que la désirabilité sociale, les attentes et les croyances concernant la tâche, pour ne citer que les plus pertinents (par ex., Woolfolk, Doris, & Darley, 2006 ; Gawronski, LeBel, & Peters, 2007).

Au regard de cela, les mesures indirectes permettent de réduire le risque que les participants déduisent les objectifs d'une expérience et modifient, ou "sur-réfléchissent ", leurs réponses pour satisfaire les attentes inférées de l'expérimentateur. L'utilisation de mesures indirectes pourrait sembler un moyen idéal pour étudier plus objectivement le sens de l'agentivité. En effet, ces dernières années, un nombre croissant de chercheurs se sont tournés vers des mesures indirectes, en particulier la liaison intentionnelle, pour étudier l'agentivité (Haggard, 2017 ; Moore & Obhi, 2012). Mais comme l'indique le modèle de l'intégration d'indice (Synofzik et al., 2013), il est indispensable de considérer les processus cognitifs à l'œuvre dans la production l'agentivité. D'ailleurs, certaines caractéristiques communes laissent supposer une relation étroite entre ces types de mesures, bien qu'elles reposent sur des processus différents. En effet, la liaison intentionnelle et le jugement explicite de l'agentivité sont diminués par le décalage temporel entre une action et sa conséquence (Chambon et al., 2015 ; Imaizumi & Tanno, 2019 ; Ruess, Thomaschke, & Kiesel, 2018). De surcroît, ces mesures sont toutes deux sensibles à l'absence de correspondance perceptive ou sémantique entre l'action et la conséquence (Sato, 2009 ; Vastano, Deschrijver, Pozzo, & Brass, 2018). Selon l'approche intégrative, les mesures directes serviraient surtout à mesurer le niveau cognitif de l'agentivité (jugement d'agentivité). Tandis que les mesures indirectes serviraient surtout à mesurer le niveau sensorimoteur (sentiment d'agentivité).

Pourtant, les liens qui unissent ces mesures encore peu étudiées au sein d'un même paradigme (Ebert & Wegner, 2010 ; Dewey & Knoblich, 2014). Ebert et Wegner (2010) ont développé un paradigme qui consiste à tirer et à pousser une manette de jeu afin de rapprocher ou d'éloigner des objets à l'écran. Les participants ont vu des images d'objets quotidiens tels qu'une pomme, puis ont poussé ou tiré la manette. Dans certains essais de "traction", la pomme semblait se déplacer vers le participant, et donc le mouvement de l'objet correspondait à leur action, tandis que dans d'autres, il y avait une absence de correspondance dans laquelle l'objet s'éloignait de la personne lorsqu'elle tirait la manette et se rapprochait d'elle lorsqu'elle poussait la manette. Afin d'examiner l'effet du délai temporel sur l'agentivité, les auteurs ont utilisé trois délais différents (100, 400 et 700 ms). Ils ont mesuré de façon directe par un jugement d'agentivité, en demandant aux participants d'indiquer dans quelle mesure ils pensaient que leur mouvement avait causé le mouvement de l'objet, sur une échelle de Likert en 7 points. Parallèlement, ils ont mesuré de façon indirecte à l'aide d'une méthode d'estimation d'intervalle reflétant la liaison intentionnelle entre action et conséquence. Les résultats ont montré que les intervalles estimés étaient plus courts (plus forte liaison intentionnelle) et que les jugements d'agentivité étaient plus importants pour les essais cohérents que pour les essais incohérents. Notons que les résultats ont montré que les jugements d'agentivité se reposaient

davantage sur la correspondance action-conséquence tandis que la liaison intentionnelle dépendait aussi du délai action-conséquence.

D'autres études montrent que ces deux mesures peuvent être partiellement interdépendantes, à court terme (Moore et al., 2012). Il a été montré que la liaison intentionnelle est sensible aux attentes et aux croyances sur le contrôle des conséquences d'une action. Par exemple, lorsque différents degrés d'automatisation ont été insérés dans le contrôle d'une conséquence d'action dans le contexte d'une tâche de navigation aérienne, la liaison intentionnelle se produit en fonction du degré perçu de contrôle sur le système (Berberian, Sarrazin, Le Blaye, & Haggard, 2012).

De même, il a été démontré que les intentions autodéclarées de produire (ou d'arrêter) une conséquence, modulent la liaison intentionnelle (Engbert et al., 2007), tout comme les croyances manipulées expérimentalement concernant la source de la conséquence (soi ou un autre agent, Desantis et al., 2011 ; Haering & Kiesel, 2012). Cette influence des croyances ou attentes conscientes sur les mesures de l'agentivité a également montré sur une autre mesure indirecte de l'agentivité, l'atténuation sensorielle. Par exemple, Desantis, Weiss, Schütz-Bosbach, et Waszak (2012) ont induit la croyance qu'une conséquence associée à une action serait soit contrôlée par le participant, soit par l'expérimentateur. Les deux effectuaient toujours l'action, mais la conséquence sensorielle devait être produite par celui dont le nom était affiché sur l'écran. En réalité, seules les actions des participants déclenchent les conséquences. Les résultats montrent que cette modification des croyances à priori sur la source d'une conséquence (soi-même ou un autre) module l'atténuation sensorielle, les conséquences apparemment produites par soi-même étant plus atténuées que celles apparemment produites par un autre.

À la lumière de ce qui précède, nous suggérons que, si les mesures directes et indirectes du sens de l'agentivité sont effectivement issues de processus distincts, ils ne sont pas totalement indépendants. Cependant, il est difficile d'identifier précisément les indices servant à produire l'agentivité, car l'ensemble des mesures précédentes se concentrent sur l'influence contextuelle. En effet, elle n'est étudiée qu'en rapport avec une situation expérimentale contextualisée et donc locale. C'est pourquoi il a récemment été proposé l'utilisation de mesure dite globale afin d'apporter une estimation relativement stable de la tendance individuelle à se sentir agent (Tapal, Oren, Dar, & Eitam, 2017).

- **Le niveau global et son intérêt :**

Il semble qu'un niveau de l'agentivité reste peu exploré, car intégré sans distinction au sein des indices cognitifs basés sur les croyances et connaissances préalables des individus. Pourtant, l'agentivité est une expérience particulière, au centre de nos interactions

avec l'environnement, générant des croyances causales. Il est pertinent de faire l'hypothèse que l'ensemble de ces croyances fasse émerger une disposition individuelle à l'agentivité, indépendamment d'une situation particulière. Cette disposition se définit comme une caractéristique habituelle, stable de ses expériences, pensées et émotions. En ce sens, elle se définit comme un trait individuel, axé uniquement sur soi-même (Parks-Leduc, Feldman, & Bardi, 2015). Autrement dit, il existerait un trait psychologique de l'agentivité.

En effet, le sens de l'agentivité se développe tout au long de la vie et semble commencer dès le début de celle-ci, voire avant la naissance (Fagard, Esseily, Jacquey, O'regan, & Somogyi, 2018 ; Verschoor & Hommel, 2017). Évidemment, la distinction entre soi et le monde est d'abord instable et imprécise, mais elle fournit les premiers indices d'agentivité, qui seront associés avec d'autres et affinés tout au long de la vie. En d'autres termes, un répertoire croissant de indices est « internalisé » dans ses expériences d'agentivité, servant d'indices, ou plutôt méta-indices, d'agentivité (Synofzik et al., 2006). On retrouve cela au travers des effets spécifiques de l'agentivité sur la mémorisation (par ex., Engelkamp, 1998) qui tendent à considérer que la mémoire s'appuie sur le niveau d'agentivité comme un indice supplémentaire pour former une trace mnésique distinctive (Cloutier & Macrae, 2008 ; Loon, 2020 ; Hon & Yeo, 2021).

Ces indices servant à construire des jugements d'agentivité de plus en plus complexes, prenant en compte les indices cognitifs, internes et externes, sur les évènements possibles du monde qui nous entoure ainsi que leurs causes éventuelles. Ces jugements contribuant à l'élaboration de croyances, décontextualisées d'un évènement particulier, pouvant à leur tour influencer l'intégration sensorimotrice et les futures constructions d'agentivité.

Cette approche de l'agentivité en trait individuel, semble confortée par un ensemble d'étude montrant que l'agentivité, mesurée de façon directe ou indirecte, est influencée par d'autres traits individuels (par ex., Spengler, von Cramon, & Brass, 2009).

La schizotypie, ou la prévalence de pensées et de comportements inhabituels collectivement associés à la schizophrénie constitue une influence des traits individuels sur l'agentivité. Une agentivité erronée est l'un des symptômes diagnostiques de la schizophrénie (Blakemore et al., 2002 ; Franck et al., 2001) et les traits individuels schizotypiques sont corrélés à des déficits de prédiction des effets de ses propres actions (Asai, Sugimori, & Tanno, 2008). Ce déficit entraîne plus de risques d'être perturbé par des croyances envahissantes et des jugements confus. Des erreurs d'attribution peuvent en résulter, tel qu'une sous-attribution des événements autoproduits ou bien une sur-attribution des événements extérieurs, attribués à soi plutôt qu'à des causes externes (Synofzik & Voss, 2010 ; Synofzik et al., 2010). Cette influence du trait individuel de schizotypie a également été montrée

auprès de la population non clinique. Les résultats indiquent une liaison intentionnelle moins forte (C. Pan et al., 2021) et un plus grand impact des indices postdictif (Moore, Tang, & Cioffi, 2020) sur l'agentivité. Également, le biais d'auto-complaisance, correspondant à la tendance à faire plus d'attributions internes pour les événements positifs et plus d'attributions externes pour les événements négatifs, semble influencer l'agentivité (Takahata et al., 2012 ; Yoshie & Haggard, 2013). Ce biais, omniprésent dans la population, présente une variabilité importante selon l'âge, la culture et la psychopathologie (Mezulis, Abramson, Hyde, & Hankin, 2004). Notons que les enfants et les adultes âgés présentent un biais plus important. De même, les individus subissant de l'anxiété, une dépression ou encore de troubles du déficit de l'attention/hyperactivité montrent également des biais plus faibles que les autres.

Ajoutons qu'une récente étude indique que ce biais de complaisance augmenterait selon les croyances au libre arbitre des individus, une notion proche du sens de l'agentivité. Une plus forte croyance au libre arbitre prédisant des comportements de punition ou de récompense envers les autres (Genschow, Rigoni, & Brass, 2017). Enfin, la concentration de certaines hormones a également été montrée comme associée à l'agentivité, par exemple la dopamine (Moore et al., 2012) et la testostérone (Hammerschlag & Lake, 2014).

Un autre type de mesure pour étudier l'agentivité, une mesure directe globale sur ce trait individuel d'agentivité est pertinente. Des mesures semblent en effet conceptuellement liées à l'agentivité globale, mais qui sont : soit spécifiques au contexte, comme une mesure récente sur la perturbation de l'agentivité pendant l'hypnose (Polito, Barnier, Woody, & Connors, 2014), soit des mesures qui évaluent des notions connexes, mais qui ne saisissent pas directement l'agentivité, comme l'auto-efficacité (Bandura, 1977), le locus de contrôle (Rotter, 1966) ou le sentiment de contrôle (Lachman & Weaver, 1998). D'autres mesures existantes, apparemment liées, mais encore plus éloignées de la nature actuelle de l'étude de l'agentivité humaine, incluent celles sur les croyances philosophiques très générales et abstraites, comme le déterminisme ou le fatalisme ou le libre arbitre (Paulhus & Carey, 2011). À notre connaissance, seule l'étude de Tapal et al. (2017) a proposé et validé une telle mesure. Cependant, elle n'a pas été comparée à d'autres types de mesures afin de mieux connaître son influence sur les différents niveaux d'agentivité. Celle-ci a servi de base pour la mesure développée dans le premier axe expérimental, et y est présentée plus en détail.

1.2.3 L'agentivité globale, facteur d'apprentissage ?

L'apprentissage constructiviste implique deux phases : d'abord, l'individu construit la connaissance sur la base de ses expériences sensorimotrice, puis la connaissance est reconstruite en fonction des caractéristiques individuelles et de l'efficacité du processus (Fosnot, 2013). Les caractéristiques de l'individu ont un rôle important dans le processus d'apprentissage et l'agentivité, prise selon un niveau dispositionnel, peut l'influencer.

On retrouve une illustration de cela au travers de l'effet d'enactment. Il montre qu'une phrase est mieux mémorisée lorsqu'elle est produite directement par soi, plutôt qu'un autre, ou lorsqu'elle est simplement lue (Engelkamp, Zimmer, Mohr, & Sellen, 1994 ; Engelkamp, 2001). Cet effet repose sur une meilleure intégration des évènements sur la base d'une attribution à soi, autrement dit une agentivité. Réaliser soi-même l'action permet une implication plus importante dans la situation en rattachant les phrases d'action à mémoriser à un vécu subjectif. En étant agent, on va pouvoir intégrer les éléments de la phrase par le biais d'une attribution à sa propre expérience sensorimotrice. Denis, Engelkamp, et Mohr (1991) ont démontré que lorsque le participant s'imagine réaliser l'action, cela entraîne des performances plus importantes que lorsqu'il imagine une autre personne réaliser l'action. L'agentivité semble jouer un rôle important sur cet effet. Il a même été avancé qu'elle pourrait augmenter la pertinence motivationnelle des informations traitées, conduisant à cette amélioration mnésique (Eitam & Higgins, 2010). De plus, des études ont montré qu'offrir un choix, illusoire ou non, à des participants améliore leur rétention des informations, même non pertinente pour la tâche expérimentale ou lorsque la préférence des participants est contrôlée (Cloutier & Macrae, 2008 ; Watanabe & Soraci, 2004).

Cependant, il semble que le fait de donner le choix n'ait pas le même effet selon les cultures (Iyengar & Lepper, 1999). À titre d'illustration, pour les enfants d'Asie, la motivation et l'apprentissage étaient améliorés lorsque leur mère choisissait, par rapport au choix qu'ils faisaient eux-mêmes ou à celui d'un membre du groupe extérieur. Par conséquent, nous soutenons que ce n'est pas le choix en soi qui cause les avantages de mémorisation, mais la perception de contrôle sur la situation, ou l'agentivité. De plus, l'influence interindividuelle, au travers de la culture, renvoie à la perspective d'une influence de l'agentivité globale sur l'apprentissage.

Un autre aspect concerne l'amélioration des fonctions exécutives, en particulier l'inhibition des informations non pertinentes. Tel est le cas lorsque l'on demande à des apprenants de penser à un moment où ils contrôlaient les autres, par rapport au moment où on leur demande de penser à un moment où ils étaient contrôlés par les autres (P. K. Smith, Jostmann, Galinsky, & Van Dijk, 2008). En outre, le fait de demander à des apprenants

de réfléchir à leur agentivité en répondant à des questions relatives au contrôle avant une tâche de rappel améliore leur rappel lorsque la tâche est relativement appréciée et que la performance est élevée, alors qu'elle diminue la performance de la mémoire lorsque la tâche est moins appréciée et plus difficile (Chatman & Sparrow, 2011).

L'effet des stéréotypes sur les performances peut également être pertinent à considérer. Si les stéréotypes concernant un groupe dont une personne est membre deviennent saillants dans un domaine pertinent, ils induisent une diminution des performances par rapport aux performances potentielles de cette personne si le stéréotype n'avait pas été activé (Steele & Aronson, 1995). Cet effet robuste a été documenté à plusieurs reprises avec divers groupes stéréotypés négativement dans un domaine, comme les femmes en mathématiques et en sciences (Spencer, Steele, & Quinn, 1999), les Afro-Américains dans les tests d'intelligence (Steele & Aronson, 1995), les hommes dans la sensibilité sociale (Koenig & Eagly, 2005), ou les personnes âgées dans les tâches mnésique (Levy, 1996).

Bien que ces études ne portent pas sur l'agentivité, des travaux récents sur le mécanisme des effets de la menace stéréotypée indiquent que les tâches ont tendance à être perçues comme plus difficiles en cas de menace stéréotypée et que la difficulté ressentie est plus susceptible d'être attribuée à soi (Schmader, Forbes, Zhang, & Berry Mendes, 2009). Par conséquent, il est probable que l'agentivité soit impliquée dans le mécanisme de la menace des stéréotypes et des changements associés de la performance de la mémoire.

Il a été démontré que l'affirmation de soi, opérationnalisée sous la forme d'une simple rédaction améliore la performance scolaire et les notes à long terme (Cohen, Garcia, Purdie-Vaughns, Apfel, & Brzustoski, 2009 ; Purdie-Vaughns et al., 2009). Certains environnements éducatifs mettent l'accent sur la responsabilité personnelle de l'élève vis-à-vis de son apprentissage et rendent plus fréquente la prise en compte de sa propre responsabilité. Il est important de comprendre les conséquences de cet environnement sur le processus d'apprentissage. Selon une étude récente (Chatman, 2014), le fait d'aborder explicitement et fréquemment les questions de l'agentivité et du contrôle personnels peut augmenter ou diminuer la performance de rappel selon que la tâche est appréciée ou non, facile ou difficile.

Cette influence de l'agentivité globale semble cohérente avec des études autour de notions proches, telles que le locus of control ou l'attribution. Dans le contexte de l'apprentissage et de l'éducation, des études corrélationnelles montrent que l'estimation globale de la disposition à l'égard de la maîtrise de soi (locus de contrôle interne) est associée à une motivation et à des comportements de réussite accrus. Cependant, les corrélations varient largement d'une étude à l'autre et un mécanisme plausible n'a pas encore été pro-

posé, même la direction causale ne peut être déduite (pour une revue, voir Stipek & Weisz, 1981). La théorie de l'attribution (Weiner, 2000) englobe la dimension du caractère interne ou externe de la cause attribuée et comprend également deux dimensions supplémentaires, à savoir la contrôlabilité et la stabilité de la cause perçue. Les attributions concernant la cause d'un résultat perçu comme un succès ou un échec déterminent la réaction de l'individu et son comportement futur. Ces attributions affectent les comportements liés à la réussite en modifiant les attentes concernant les performances futures, la durée et la malléabilité de ces attentes et leur impact sur l'estime de soi. Ces considérations théoriques prédisent que les attributions internes, stables et contrôlables peuvent être bénéfiques en cas de réussite scolaire en créant des attentes positives et des augmentations d'estime de soi.

L'ensemble de ces résultats tendent à montrer qu'au-delà, d'une situation particulière, l'agentivité des individus pourrait influencer la façon dont ils apprennent et utilisent leurs ressources cognitives. C'est donc sur la base de ce constat que nous proposons d'interroger les liens potentiels existants entre l'agentivité globale et l'apprentissage.

1.3 La place de l'outil de réalité virtuelle

Comme nous l'avons vu précédemment, les interactions sensorimotrices jouent un rôle fondamental dans l'apprentissage, permettant de construire du sens aux expériences particulières et aux connaissances générées par un agent. Dans ce cadre, les technologies interactives (par ex., cours en ligne, jeux vidéo, logiciel, tablette tactile, etc.) sont des outils puissants pour engager les apprenants à travers de multiples modalités sensorielles (visuelle, auditive, tactile) et motrices (toucher, cliquer, écrire, suivi oculaire, etc.) (Valverde-Berrocoso, Garrido-Arroyo, Burgos-Videla, & Morales-Cevallos, 2020). Elles peuvent ainsi faciliter l'apprentissage, la compréhension et la réussite, mais aussi la motivation, la collaboration, la réflexion ou la résolution de problèmes (Bower, 2019). Nos travaux se sont portés sur l'une de ces technologies, la réalité virtuelle (RV), de par ses capacités uniques et son potentiel offert pour la pédagogie comme la recherche. Nous présenterons brièvement la réalité virtuelle, avant de discuter plus en détail ses liens avec l'agentivité et l'apprentissage. Pour finir, les principaux dispositifs de réalité virtuelle seront évoqués pour étayer le choix du matériel utilisé dans cette thèse.

1.3.1 Présentation de la Réalité Virtuelle (RV)

1.3.1.1 Définitions

Concernant la définition de la RV, nous utiliserons la suivante : *«La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensorimoteurs»* (Fuchs, 2017, p. 24). Cette définition permet de ne pas restreindre la réalité virtuelle uniquement à une branche technique de l'informatique, contrairement à d'autres définitions (Mikropoulos & Natsis, 2011). En effet, il ne s'agit plus fondamentalement de traiter de l'information, mais de créer un environnement virtuel dans lequel un être humain va percevoir et agir.

La RV sert à permettre à un individu, ici l'utilisateur, d'être en immersion au sein d'un environnement virtuel (ou artificiel), créé numériquement afin d'être modifiable. Ajoutons que l'utilisateur aura des interactions avec l'environnement virtuel, basées sur ses mécanismes sensorimoteurs et cognitifs, étant à la fois acteur et spectateur, il est le centre du système (voir figure 11). Les informations récoltées normalement dans l'environnement physique vont être remplacées par des stimulations sensorielles plausibles, générées par ordinateur, afin de permettre à la cognition de construire une expérience réaliste (Guadagno, Blascovich, Bailenson, & McCall, 2007 ; Slater, 2009).

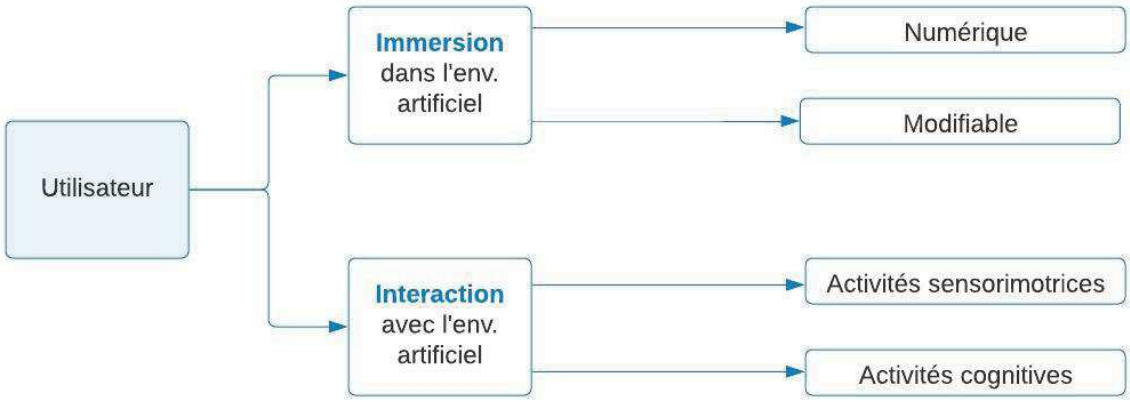

FIGURE 11 – Notions fondamentales de la réalité virtuelle. Adapté de Fuchs (2017)

1.3.1.2 Bref historique de la RV

La réalité virtuelle n'est pas aussi récente que l'on pourrait le croire (voir figure 12, pour un schéma historique). Les premiers dispositifs de réalité virtuelle voient le jour dans les années 1960 avec le Sensorama (Heilig, 1962). Il était équipé d'un écran couleur stéréoscopique, des ventilateurs, des émetteurs d'odeurs, un système de son stéréo et une chaise mobile. Grâce à cela, il permettait, notamment ,de reproduire une expérience de promenade à moto dans New York. Ensuite, Sutherland a développé des appareils d'affichage montés sur la tête (Sutherland, 1968). Ce système a contribué à populariser la RV dans le domaine de la recherche (Sherman & Craig, 2003). En même temps, des systèmes de suivi des mouvements ont été introduits (DeFanti et al., 2009). Il était possible d'enregistrer et d'interpréter certaines postures du corps ou mouvements des mains à l'aide d'un ordinateur. Lanier a également contribué à la promotion de la RV à la fin des années 1980 en introduisant les premiers avatars (Riva, 2005).

En 1990, le développement des jeux vidéo a contribué à cette diffusion de la RV avec les premiers systèmes de jeux d'arcade utilisant des casques de RV. Ensuite les premiers environnements virtuels projetés directement sur les murs d'une pièce ont été introduits (c.-à-d., les CAVEs - Manjrekar et al., 2014). La recherche en RV existe depuis de nombreuses années, cependant les coûts sont très importants, entre 50 000 et 100 000 dollars en 2006 (Hodgson et al., 2015).

Enfin, à partir de 2013, les dernières innovations technologiques ont permis de démocratiser pleinement la RV, notamment avec l'Oculus Rift ou le HTC Vive qui ont été rapidement adoptés par des millions d'utilisateurs (Market, 2017 ; Sachs et al., 2016). Le prix d'un dispositif avoisinant entre 1 000 et 3 000 dollars en 2014. C'est ainsi que la recherche en RV a atteint un niveau remarquable au cours des dix dernières années, comme

en témoigne le nombre de publications. Sur près de 1.000 articles trouvés sur ce sujet en 2005 (Riva, 2005), on trouve aujourd'hui plus de 10 474 articles, dont 5 495 à partir de 2013 (recherche rapide avec les mots clés "virtual reality", sur PsycINFO, consulté le 31 octobre 2020). Pour aller plus loin dans l'histoire de la RV, nous conseillons de lire l'article de Bown (2017).

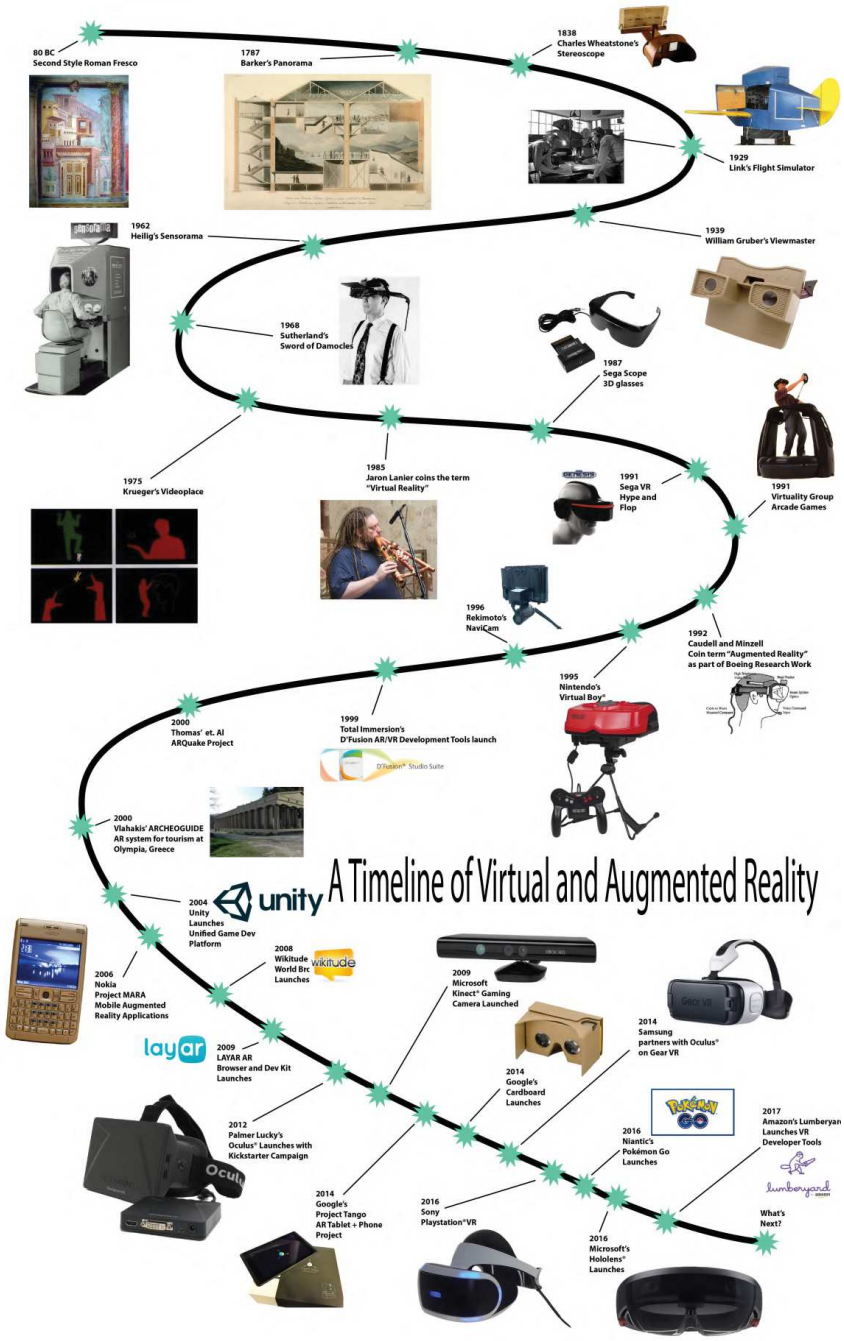

FIGURE 12 – Exemples des dispositifs de réalité virtuelle à travers le temps.

1.3.1.3 Les dispositifs de RV

Parmi les différents types de RV, le HMD permet à l'utilisateur d'être immergé visuellement. Il s'agit d'un casque monté sur la tête de l'utilisateur, projetant l'environnement virtuel au travers de deux petits écrans (un pour chaque œil), permettant une vision stéréoscopique, et souvent des écouteurs, permettant un son spatialisé. Ils sont équipés d'un dispositif de suivi de la tête qui enregistre les mouvements et reproduit le mouvement virtuellement, à une cadence élevée (au moins à 60 Hz) pour éviter une latence. L'utilisateur peut regarder autour de lui, comme il le ferait instinctivement dans la vie réelle, avec un environnement l'entourant à 360°. L'affichage du HMD peut être occlusif ou laisser visible l'environnement réel (HMD transparent). Les HMD transparents sont généralement utilisés en réalité augmentée (c.-à-d., ajout d'éléments virtuels sur un environnement réel) avec des technologies tels que les Hololens de Microsoft ou les Google Glasses. Les HMD sont faciles à mettre en place, non invasifs et constituent une technologie plutôt peu coûteuse. Ce dispositif HMD est associé à un ordinateur par une série de fil, ce qui permet de générer et mettre à jour l'environnement virtuel. Ils ont la possibilité de mesurer 6 degrés de liberté (6-DoF) : 3 degrés de rotations pour la tête (gauche/droite ; haut/bas ; penché gauche/droite) et 3 degrés de déplacement de la tête (avant/arrière ; gauche/droite ; haut/bas).

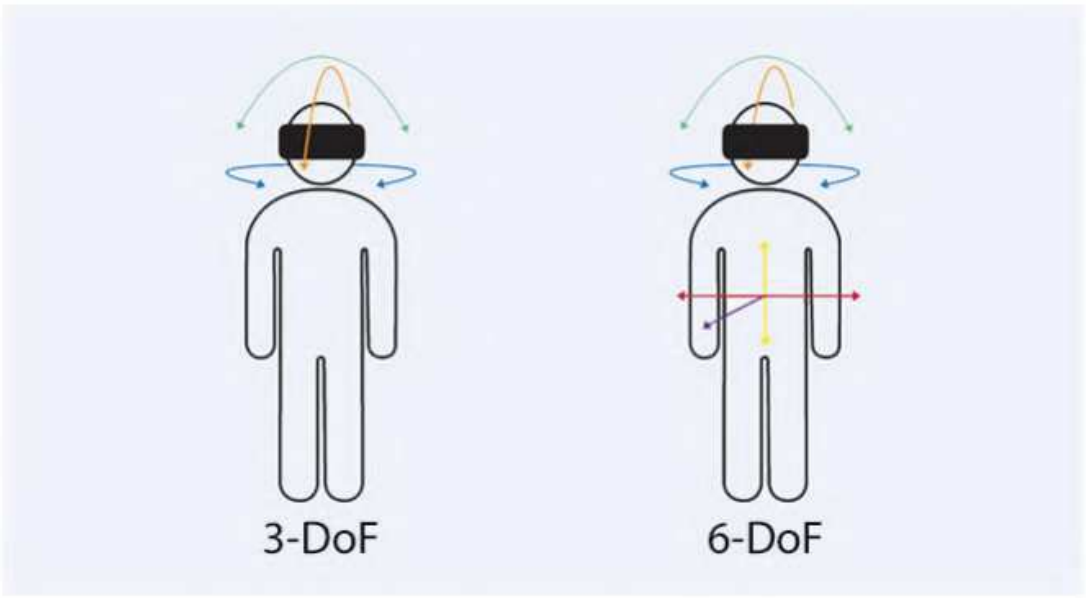

FIGURE 13 – Représentation de deux types casques HMD : les flèches indiquant les différentes directions de mouvement prises en compte

Il existe également d'autres types de dispositifs pour la RV. Un dispositif portable du HMD, utilisant un smartphone (par ex., Google Cardboard) ou intégrant directement un ordinateur miniature (par ex., Oculus Go). Ce type de RV est cependant limité actuellement à des environnements virtuels simples avec peu d'interactions ou à des vidéos 360°, due aux faibles puissances de calcul des composants. Ils mesurent uniquement 3 degrés de liberté (3-DoF) : 3 degrés de rotations pour la tête (gauche/droite ; haut/bas ; penché gauche/droite). Voir la figure 13 pour un schéma.

Un dispositif fixe existe aussi, il consiste en une pièce où l'on va projeter un écran sur tous les murs, ainsi que le sol et le plafond, et où l'on va analyser les actions de l'utilisateur par différents capteurs. Appelé CAVE, pour Cave Automatic Virtual Environments, il s'agit d'un dispositif encore assez cher, nécessitant un espace dédié et avec, du au manque de logiciel accessible de programmation, des environnements virtuels complexes à développer et contrôler. Toutes ces caractéristiques font qu'il est difficile pour eux d'être largement utilisés dans l'éducation ou la formation (Freina & Ott, 2015 ; Mestre, 2017) et que nous n'avons pas envisagé ce dispositif pour nos études. Pour aller plus loin et avoir une meilleure vue d'ensemble des dispositifs de RV actuels, nous conseillons de lire la revue de Anthes, García-Hernández, Wiedemann, et Kranzlmüller (2016).



FIGURE 14 – (Gauche) Dispositif CAVE. (Droite) Dispositif HMD.

Pour nos études, nous avons donc choisi le dispositif le plus utilisé actuellement, qui est l'affichage par écrans monté sur la tête (c.-à-d., un HMD pour Head-Mounted Display). Nous avons utilisé le HTC Vive (voir figure 15, côté gauche), avec une résolution de 1200 x 1080 pixels par œil, et un taux de rafraîchissement de l'affichage de 90 Hz. La latence estimée de bout en bout du système est de 22 ms (Niehorster, Li, & Lappe, 2017). L'environnement virtuel a été programmé à l'aide du moteur de jeu Unity 5.6 (voir figure 15, côté droit).



FIGURE 15 – Figure. Le HTC Vive Figure. Logiciel de développement 3D - Unity 5.6

1.3.1.4 Les notions fondamentales de la RV

L'idée de la RV repose sur le développement d'outils et de techniques pour rendre « sensible » des informations numériques. Autrement dit, transformer des informations amodales (basées sur des connecteurs logiques et des courants électriques) en un stimulus sensoriel, intégrable et interactif pour l'utilisateur. En utilisant des interfaces comportementales, qui vont faire le lien entre les comportements humains et les traitements informatiques. Ces interfaces regroupent des dispositifs visuels, auditifs ou haptiques, afin de permettre à l'utilisateur de faire l'expérience de l'environnement virtuel comme s'il en faisait partie intégrante. Les utilisateurs ne sont plus simplement des observateurs externes d'images sur un écran d'ordinateur, mais des agents, immergés, dans un monde virtuel (pour une revue récente, voir Fuchs, 2017). De plus, des chercheurs ont trouvé une difficulté à se remémorer si un événement passé avait été expérimenté virtuellement ou physiquement, renforçant la perspective que l'utilisateur va vivre une expérience en RV de façon authentique, y intégrant ces expériences de manière similaire à la réalité (Rubo, Messerli, & Munsch, 2021).

Pour autant, définir la notion d'immersion, rendu possible par les capacités d'interaction de la RV, est assez complexe. Une partie des chercheurs suggèrent que l'immersion devrait être considérée comme un attribut technologique qui peut être évalué objectivement (Slater & Wilbur, 1997). L'expérience immersive dépend fortement des caractéristiques techniques du dispositif de RV (Radianti, Majchrzak, Fromm, & Wohlgenannt, 2020). Tandis que d'autres définissent l'immersion comme une croyance subjective et individuelle, c'est-à-dire un phénomène psychologique (Witmer & Singer, 1998).

Si ces deux définitions sont opposées, elles sont aujourd'hui considérées comme complémentaires (Gorini, Capideville, De Leo, Mantovani, & Riva, 2011). Ainsi, les caractéristiques matérielles et techniques de la RV, permettant les interactions avec l'environnement virtuel, correspondent à une immersion sensorimotrice, appelée aussi uniquement immersion. Partant de cela, l'utilisateur peut construire sa perception de l'environnement virtuel

et faire émerger une immersion cognitive, appelée aussi sentiment de présence (Sherman & Craig, 2003). Ce sentiment d'être présent dans l'environnement virtuel ne se limite pas à la technologie utilisée, mais à la crédibilité de l'expérience en général (Karaseitanidis et al., 2006). Il va être renforcé lorsque des modalités auditives, olfactives ou des indices sensoriels sont présents (Dinh, Walker, Hodges, Song, & Kobayashi, 1999). De plus, la propension à ressentir le sentiment de présence diffère d'une personne à l'autre (Mütterlein, 2018) et aura des effets médiateurs sur l'efficacité de la RV (Emmelkamp, 2005). Les traits de personnalité peuvent aussi jouer un rôle, par exemple les personnalités plus anxieuses ou réservées ont eu une expérience moins positive en RV et se sentent également moins présentes (Jensen & Konradsen, 2018).

Il y a un consensus sur le fait que l'expérience de la présence est une perception complexe formée par l'intégration multimodale des interactions sensorimotrices et de divers processus cognitifs (Riva, Davide, & IJsselsteijn, 2003 ; Riva et al., 2007). Notons que des études expérimentales ont pu apporter un ensemble de preuves quant à la capacité de se sentir présent dans l'environnement virtuel et réagir de façon cohérente. Par exemple, les utilisateurs ont des réponses physiologiques (par ex., rythme cardiaque, fréquence respiratoire) et des réponses comportementales (par ex., évitements, ressentis de peur) réalistes lorsqu'ils sont confrontés à l'approche du vide dans un environnement virtuel (Usoh et al., 1999 ; Meehan, Insko, Whitton, & Brooks Jr, 2002). On trouve également que les normes sociales (par ex., la distance interpersonnelle) sont conservées (Sanz, Olivier, Bruder, Pettré, & Lécuyer, 2015). De la même manière, des comportements sociaux plus complexes se retrouvent au sein des environnements virtuels, par exemple les hommes timides montrent plus d'anxiété lorsqu'ils interagissent avec un avatar féminin que les hommes confiants (X. Pan, Gillies, Barker, Clark, & Slater, 2012).

En résumé, l'expérience d'être présent au sein d'un environnement virtuel sera d'autant plus grande que l'implication de l'utilisateur sera active. Il pourra alors se reposer sur ces interactions au sein de l'environnement virtuel pour se l'approprier.

1.3.2 La réalité virtuelle (RV) et l'apprentissage

En raison du développement constant des équipements techniques, les technologies immersives, telle que la RV, sont de plus en plus utilisées dans l'éducation en plus des méthodes d'apprentissage conventionnelles (Freina & Ott, 2015 ; Radianti et al., 2020 ; Papanastasiou, Drigas, Skianis, Lytras, & Papanastasiou, 2019). La RV qui a cessé d'être perçue uniquement comme un simulateur complexe et coûteux, disponible pour la formation des pilotes et du personnel médical (J. H. Lee et al., 2017) est maintenant vu comme un outil abordable et accessible pour n'importe quel apprenant (Gunn, Jones, Bridge, Rowntree, & Nissen, 2018).

Une récente théorie, au travers du modèle CAMIL (Cognitive Affective Model of Immersive Learning - Makransky & Petersen, 2021), prend en compte les plus récentes recherches afin de proposer un modèle explicatif sur l'apprentissage au travers de la RV. Il s'appuie sur des recherches antérieures qui spécifient les facteurs influençant l'apprentissage dans un environnement immersif (Makransky & Lilleholt, 2018 ; Makransky & Petersen, 2019). Ces études ont testé empiriquement un cadre développé et proposé par Lee (2010), qui intègre des constructions pertinentes pour l'apprentissage par ordinateur, sur la base de plusieurs modèles de technologie des médias (par ex., Salzman, Dede, Loftin, & Chen, 1999 ; Alavi & Leidner, 2001). Selon le modèle CAMIL le dispositif de RV n'est pas directement responsable de l'apprentissage. Il s'agirait plutôt de l'utilisation de méthodes pédagogiques, plus ou moins efficaces, lorsqu'elle s'appuie sur les possibilités uniques offertes par un média, ici la réalité virtuelle. Pour être efficace en RV, la méthode d'apprentissage doit exploiter au moins l'un de ses deux principaux facteurs : l'immersion et l'interaction. Reliant le premier au sentiment de présence et le deuxième au sens de l'agentivité (Johnson-Glenberg, 2019), le modèle propose, au travers de différents processus affectifs et cognitifs, que l'augmentation de ces facteurs ait des bénéfices spécifiques sur l'acquisition de connaissances factuelles, conceptuelles et procédurales ainsi qu'au transfert de connaissances.

Le cadre théorique derrière ce modèle propose que le dispositif de RV ne soit pas directement responsable de l'apprentissage, mais qu'il s'agisse plutôt de l'utilisation de méthode pédagogique, plus ou moins efficace, lorsqu'elle facilite les possibilités uniques du dispositif de RV. L'influence de l'interaction et de l'immersion sont limitées avec des situations pédagogiques utilisant une vidéo ou un PowerPoint, mais sont plus importantes avec une technologie immersive, telle que la RV. La capacité à immerger sensoriellement et permettre des interactions sensorimotrices modulables va permettre d'offrir de nouveaux outils pour guider l'apprenant afin qu'il construise des connaissances (Fromm et al., 2021 ; Jensen & Konradsen, 2018).

On retrouve des preuves de cela à travers diverses études récentes comparant l'apprentissage en RV et par ordinateur ou vidéo. Par exemple, Meyer, Omdahl, et Makransky (2019) ont montré qu'une phase de préparation à l'apprentissage (exposition aux noms et caractéristiques des connaissances) permettait de limiter la charge cognitive et augmenter le sentiment d'agentivité, comparée à une vidéo, et permettait un meilleur apprentissage. Klingenberg et al. (2020) ont montré des résultats similaires, l'utilisation d'une méthode particulière (apprentissage par l'enseignement à des pairs) a des effets spécifiques en RV par rapport à l'ordinateur.

De plus, la RV peut fournir de multiples expériences de la complexité du monde en la modélisant à une échelle perceptible ou en la symbolisant (Mikropoulos & Natsis, 2011). Nous pouvons citer le fait qu'il est possible de rendre des connaissances abstraites plus tangibles, autrement dit de modéliser des phénomènes abstraits (par ex., la mécanique quantique) qui n'ont pas de référents dans la vie réelle parce qu'ils ne peuvent pas être expérimentés en pratique ou perçus par les sens humains. L'une des application pionnière dans la RV à avoir utilisé cette capacité est *ScienceSpace*, développée par Dede (1996). Ils ont construit trois mondes virtuels qui ont permis aux étudiants d'explorer les sujets de la mécanique newtonienne, de l'électrostatique et de la structure moléculaire. Ces notions sont difficiles à comprendre, car abstraites, tridimensionnelles, et manquant de référents réels auxquels les apprenants peuvent ancrer leur expériences sensorimotrices. Dans *MaxwellWorld*, les utilisateurs peuvent créer des forces électrostatiques et explorer des champs électrostatiques sans que d'autres phénomènes n'interfèrent avec leurs effets perçus. Les utilisateurs peuvent libérer des charges positives et négatives de différentes magnitudes dans l'environnement virtuel, puis examiner de manière interactive la configuration qui en résulte. Ils peuvent également changer de point de vue pour devenir une minuscule particule chargée, ce qui renforce l'importance de la force et de l'énergie en tant que variables cruciales. Dans l'ensemble, les résultats ont montré que les élèves ont apprécié leur apprentissage dans les mondes virtuels et ont acquis une compréhension plus approfondie des connaissances scientifiques abstraites (Dede, Salzman, Loftin, & Sprague, 1999).

Également, Bennett et Saunders (2019) ont utilisé la RV afin de permettre à des apprenants de rentrer dans une cellule biologique, en passant les portes de la membrane et d'avoir un aperçu de son fonctionnement et de ses composants. Les apprenants peuvent interpréter des indices multisensoriels pour recueillir des informations tout en utilisant leurs actions pour naviguer et contrôler les objets dans l'environnement virtuel. Cette implication sensorimotrice de l'apprenant a permis d'approfondir l'apprentissage et la mémorisation sur le fonctionnement des cellules. D'autres études ont mis en avant la capacité de visualiser des modèles tridimensionnels sous différents angles afin de faciliter

la construction de connaissances abstraites (Maresky et al., 2019). Des environnements virtuels ont également été développés pour l'apprentissage de langues, en permettant d'immerger les apprenants dans un environnement culturel et linguistique pertinent ou en facilitant les associations entre un objet et son vocabulaire associé (par ex., voix prononçant le nom de l'objet et étiquette avec le nom d'écrit dessus - Parmaxi, 2020).

L'utilisation de la RV peut favoriser la motivation des apprenants par rapport aux supports d'apprentissage classiques et conduire à un plus grand engagement et à plus de temps consacré à la tâche d'apprentissage. Par exemple, Parong et Mayer (2018) ont montré que leurs participants étaient plus motivés et engagés avec le matériel d'apprentissage lorsqu'ils apprenaient dans un environnement d'apprentissage virtuel par rapport à d'autres méthodes d'apprentissage. L'effet de nouveauté des dispositifs de RV peut permettre d'ajouter de la motivation, du plaisir aux situations d'apprentissage, mais peut également distraire l'apprenant de son objectif (Makransky, Terkildsen, & Mayer, 2019b).

Jensen et Konradsen (2018) ont également examiné l'utilisation de la RV pour l'acquisition de compétences. Ils ont constaté qu'elle est utile pour l'entraînement des compétences cognitives qui sont liées aux connaissances spatiales et visuelles, au balayage visuel, aux compétences d'observation, aux compétences psychomotrices qui impliquent des mouvements de la tête, et au contrôle affectif de la réponse émotionnelle dans des situations stressantes ou difficiles. Passig, Tzuriel, et Eshel-Kedmi (2016) ont montré un meilleur apprentissage de résolution de problème par l'utilisation de la RV. Mettant en avant que cette amélioration vient de la capacité à percevoir et interagir avec l'espace du problème sous différents angles et perspectives. En effet, cela faciliterait les capacités de rotation mentale (capacité à faire pivoter des représentations mentales d'objets bidimensionnels et tridimensionnels), de mémoire et de représentation spatiale. Tous ces éléments sont des éléments clés dans le développement des compétences de résolution de problèmes.

L'étude plus récente de Radianti et al. (2020) a révélé que la RV peut être un outil approprié pour améliorer les connaissances procédurales, pratiques et déclaratives dans l'enseignement supérieur. Une autre étude de Webster (2016) a montré que les étudiants ayant appris avec un dispositif de RV ont obtenu des scores plus élevés sur un post-test de performance d'apprentissage par rapport à ceux ayant appris avec un logiciel d'ordinateur non immersif. Allcoat et von Mühlenen (2018) ont constaté des effets positifs sur le rappel lors de l'apprentissage avec en RV par rapport à une présentation de bureau ou un manuel scolaire. Ces résultats sont conformes à d'autres recherches qui ont également constaté que l'utilisation de la RV peut améliorer les résultats d'apprentissage (Alhalabi, 2016 ; Meyer et al., 2019).

Malgré toutes les études qui ont rapporté des effets positifs, quelques études ont révélé l'absence d'effet ou même des effets négatifs de l'apprentissage en RV. Richards et Taylor (2015) ont comparé un enseignement classique dispensé par un enseignant avec soit une présentation 2D par ordinateur, soit une présentation 3D par RV. Les apprenants avec la présentation 2D ont obtenu de meilleurs résultats que ceux avec la version 3D, ce qui, selon eux, s'explique par la surcharge cognitive due à l'animation 3D visuellement exigeante en RV. Ajoutons, l'étude de Makransky et Petersen (2019) qui a révélé des effets négatifs de la RV par rapport à l'ordinateur sur le rappel de connaissances et aucun effet sur le niveau de transfert. D'autres études ont suggéré que si elles ne sont pas conçues de manière appropriée, les activités d'apprentissage, basées sur la RV, peuvent entraîner une surcharge inutile des systèmes cognitifs et sensorimoteurs par rapport à l'enseignement traditionnel (Meyer et al., 2019 ; Parong & Mayer, 2018 ; Jensen & Konradsen, 2018).

Dans l'ensemble, les études évaluant la compréhension et l'apprentissage en RV, mesurant notamment la rétention ou le transfert des connaissances, ont trouvé des effets sur les tests de transfert (par ex., Makransky, Terkildsen, & Mayer, 2019a ; Chittaro & Buttussi, 2015). Cependant, elles rapportent aussi des résultats mitigés pour les tests de rétention (par ex., Makransky & Petersen, 2019). Cela suggère que, bien qu'il puisse être plus difficile pour les apprenants de saisir des informations détaillées et de les mémoriser lorsqu'ils sont dans la RV, celle-ci pourrait les aider à former une meilleure compréhension globale du matériel d'apprentissage présenté (par ex., Baceviciute, Terkildsen, & Makransky, 2021).

Néanmoins, malgré cet engouement initial autour de l'éducation immersive, la plupart des applications existantes de la RV ont été de nature expérimentale, et l'on sait peu de choses sur l'efficacité de cette nouvelle technologie pour l'apprentissage (Radianti et al., 2020 ; Jensen & Konradsen, 2018).

1.3.3 Conclusion de l'état de l'art

En somme, l'agentivité est une notion qui fait référence à l'expérience subjective de contrôler ses actions. Elle permet de se sentir agent, c'est-à-dire de ressentir un lien entre des modifications de l'environnement et ses actions afin de s'en attribuer l'origine. Elle est influencée par l'ensemble de nos interactions quotidiennes et semble influencer en retour notre perception et nos actions. En ce sens, elle semble être une notion fondamentale qu'il va être important de mesurer, notamment à l'aide de mesure directe globale, afin de pouvoir l'étudier dans un processus d'apprentissage. En effet, comme nous l'avons vu, l'approche constructiviste propose que tout apprentissage se base nécessairement sur ces expériences sensorimotrices. Elle met l'individu au centre d'un environnement propice à des interactions pertinentes et des phases de réflexion, afin de faciliter la construction de connaissances. C'est ainsi qu'un ensemble d'interaction avec certaines situations vont pouvoir structurer des traces mnésiques et former différents niveaux d'abstraction des connaissances construites par l'apprenant, en fonction de la création de similitudes entre plusieurs situations. Le contrôle de l'action acquis par l'apprentissage idéomoteur va permettre d'associer action et conséquence lors de l'exploration de l'environnement. Cette capacité d'initiation d'action orientée par, et vers, un but va pouvoir être la base de la distinction entre soi et le monde, soit la notion même d'agentivité.

Afin de mener au mieux ces études, nous avons fait le choix d'utiliser la RV dont les principaux avantages sont, l'aspect immersif et interactif, rendant l'approche constructiviste possible et efficace en termes de gains d'apprentissage. L'immersion et l'interaction génèrent, respectivement, des sentiments de présence et d'agence pour les utilisateurs, ayant ainsi la possibilité de faciliter l'apprentissage en choisissant une méthode d'apprentissage appropriée.

L'apprentissage, l'agentivité et la réalité virtuelle sont des thématiques larges, regroupant de nombreuses notions et définitions. Il n'a ainsi été fait état que des théories pertinentes pour appuyer les travaux développés dans la partie expérimentale suivante et de mettre en perspectives les résultats dans la discussion générale.

Chapitre 2

PARTIE EXPÉRIMENTALE

L'idée qui anime notre travail est d'explorer l'influence de l'agentivité lors de l'apprentissage dans un cadre délimité. De ce fait, l'agentivité sera abordée au travers d'une approche globale par une mesure en tant que trait individuel et l'apprentissage sera abordé au travers d'une approche constructiviste fondée sur l'activité sensorimotrice. Dans cette deuxième partie, nous sommes partis de l'hypothèse que l'agentivité est une notion au cœur du fonctionnement cognitif. À partir de cette hypothèse, il paraît nécessaire d'étudier spécifiquement l'impact que peut avoir le niveau d'agentivité ressenti sur les processus d'apprentissage.

Ces études sont menées à travers deux axes, correspondant aux deux sous-parties expérimentales, et portant respectivement sur : la validation d'une mesure globale de l'agentivité et ses liens avec les mesures locales (Axe 1) et l'intérêt prédictif d'une telle mesure pour l'apprentissage (Axe 2). Il est important de préciser que cette mesure globale est nécessaire pour pouvoir intégrer l'ensemble des croyances d'un individu sur son agentivité et ainsi avoir un prédicateur stable pour l'apprentissage.

Pour tester cette hypothèse, nous avons réalisé quatre études :

- **la première (axe 1)** : visant à valider une traduction française d'une échelle d'agentivité globale.
- **la deuxième (axe 1)** : mesurant les corrélations entre cette mesure locale actuelle.
- **la troisième (axe 2)** : portant sur les liens entre agentivité et apprentissage actif lors d'une situation d'exploration.
- **la quatrième (axe 2)** : portant sur les liens entre agentivité et apprentissage passif lors de l'observation d'une exploration.

A l'exception de la première et de la dernière étude, l'outil de réalité virtuelle a été utilisé puisqu'il s'intègre parfaitement à la problématique de la place de l'agentivité dans l'apprentissage, tout en s'inscrivant dans l'émergence des nouvelles technologies pédagogiques connaissant un essor et un avenir prometteur.

2.1 Axe 1 : Validation d'une mesure globale de l'agentivité

2.1.1 Introduction et objectif

À notre connaissance, il n'existe qu'une seule étude ayant proposé une mesure de l'agentivité de façon globale, celle de Tapal et al. (2017). Ils ont cherché à évaluer directement l'agentivité globale (c.-à-d., à travers différentes situations), en développant une échelle psychométrique, la Sense of Agency Scale (SoAS). Cette échelle est issue d'une analyse factorielle d'un grand nombre d'items, basé sur une large revue des différentes manières dont l'agentivité a été décrite dans la littérature en psychologie. Il convient de préciser qu'il existe une autre mesure de l'agentivité globale, la Sense Of Agency Rating Scale (SOARS - Polito et al., 2014). Cependant, cette dernière évalue le cas spécifique de l'agentivité globale pendant l'hypnose. L'échelle SoAS questionne spécifiquement les croyances concernant l'ensemble des situations pour lesquelles nous nous sommes sentis agents. Autrement dit, elle mesure l'agentivité en tant que trait individuel.

Cette mesure n'a, pour l'instant, été validée qu'en Hébreu et au travers de comparaisons avec d'autres notions connexes tels que l'auto-efficacité, le locus de contrôle, le sentiment de contrôle et le libre arbitre. Les résultats ont confirmé que le niveau d'agentivité globale, mesuré par le SoAS, capture bien un aspect unique de l'agentivité, ce qui n'a pas été abordé par ces notions connexes. Elle représente un trait individuel, reflétant les croyances des individus sur leur propre qualité d'agent, ayant un contrôle général sur leur corps, leur pensée et leur environnement immédiat. Elle permet ainsi de se dissocier de la croyance sur la capacité à réussir, obtenir ce que l'on désire (auto-efficacité), et de la croyance sur la capacité à contrôler l'environnement ou soi-même (sentiment de contrôle) (Eitam, Kennedy, & Higgins, 2013 ; Karsh & Eitam, 2015). Pour plus de détails concernant ces distinctions, voir l'étude 2 de Tapal et al. (2017).

L'échelle de Tapal, le SoAS, comprend deux facteurs, représentant des aspects opposés du SoAS : une agentivité globale positive (SoPA) et une agentivité globale négative (SoNA). Le SoPA représente le niveau de contrôle sur le corps, l'esprit et l'environnement ressenti par un individu. À l'inverse, le SoNA représente le manque de contrôle. De plus, les résultats de Tapal et al. (2017) sur la comparaison entre les mesures du SoNA et du fatalisme philosophique sont cohérents avec la littérature sur l'agentivité et l'impuissance apprise (Maier & Seligman, 2016) et les manipulations expérimentales (Karsh, Goldstein, & Eitam, 2018). Prises ensemble, ces études plaident pour une interprétation du SoNA comme un cas particulier et généralement négatif de non-contrôle de l'environnement, qui est transsituationnel/chronique, plutôt que d'une expérience spécifique d'agentivité.

Pour autant, afin de valider cette mesure d'agentivité globale, il convient aussi d'évaluer de façon plus approfondie les relations entre les mécanismes sensorimoteurs et cognitifs à l'œuvre dans l'agentivité. En effet, comme nous l'avons vu, les recherches sur le sens de l'agentivité ont montré qu'il était nécessaire de prendre en compte le niveau sensorimoteur de l'agentivité, centré sur les processus d'intégration multimodale, et le niveau cognitif de l'agentivité, centré sur les processus d'attribution et de jugement causal. Ces aspects sont théoriquement, opérationnellement et empiriquement distincts, et servent de composants significativement séparés de l'expérience d'agentivité. L'approche intégrative de l'agentivité a montré que chacun d'entre eux possède un pouvoir explicatif unique et souvent interactif par le biais de divers mécanismes dans une variété de contextes de recherche fondamentale et appliquée (Dewey & Knoblich, 2014 ; Synofzik et al., 2008, 2013). **Le premier objectif de cet Axe 1 propose de rendre compte, au travers de l'étude n°1, de la première adaptation du SoAS dans une autre langue, le français.** Pour cette version française de l'échelle Sense of Agency Scale (F-SoAS), nous avons analysé les réponses d'un échantillon de 517 personnes de langue maternelle française.

Le deuxième objectif de cet axe est de développer les liens conceptuels et empiriques autour de l'échelle d'agentivité globale nouvellement adaptée par l'étude 1. Pour cela, nous avons évalué si les mécanismes sous-jacents de cette mesure de l'agentivité globale sont communs aux autres mesures actuelles de l'agentivité au travers de l'étude 2. Elle va ainsi mesurer les corrélations entre les facteurs de l'échelle d'agentivité globale et les différentes mesures actuelles d'agentivité. Cette deuxième étude utilisera la mesure la plus utilisée actuellement pour l'étude de l'agentivité, à savoir le paradigme de la liaison intentionnelle (ou Intentional Binding - Haggard et al., 2002 ; Moore et al., 2012). Pour rappel, il fait référence à la compression de l'intervalle perçu entre les moments rapportés des actions et de leurs conséquences. Cet effet peut être mesuré par différentes méthodes : chronométrage de l'action ou du résultat individuel avec une horloge de Libet (Haggard et al., 2002), jugement de délai (Kawabe, Roseboom, & Nishida, 2013) ou estimation directe de l'intervalle entre l'action et la conséquence (Engbert et al., 2007).

Cet effet est généralement considéré comme une mesure indirecte du sens de l'agentivité, car l'ampleur de la liaison est réduite dans les actions involontaires. La liaison intentionnelle peut être mesurée en déduisant les intervalles temporels entre le jugement de réalisation d'une action et d'une conséquence de la différence dans le moment rapporté des événements d'action et de conséquence lorsque la conséquence est associée à l'action (conditions opérantes) ou lorsque l'un ou l'autre événement se produit isolément (conditions baselines). Mesurée de cette manière, la liaison intentionnelle peut être considérée comme deux décalages opposés des temps rapportés entre les conditions baselines et les conditions opérantes : un décalage vers l'avant des jugements sur le moment de l'action vers le moment de la conséquence (liaison d'action), et un décalage vers l'arrière des jugements sur le moment de la conséquence vers le moment de l'action (liaison de conséquence) (voir la figure 16 pour un schéma explicatif).

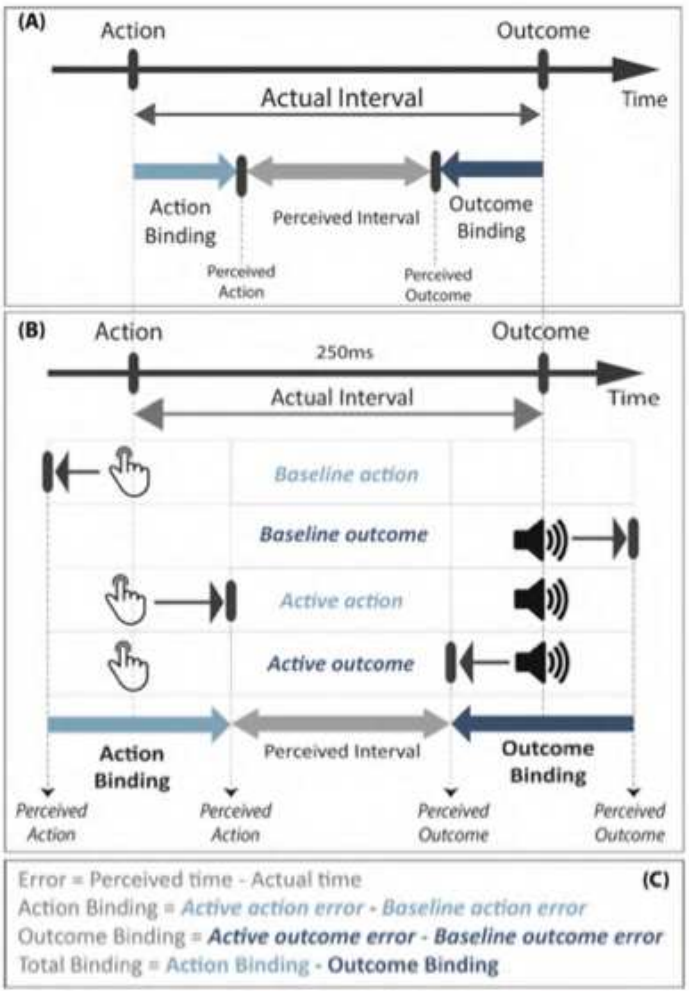

FIGURE 16 – (A) La liaison intentionnelle (Intentional Binding - IB). (B) Dans les conditions 'baseline', seul un élément est utilisé, l'action ou la conséquence. Dans les conditions 'opérantes', l'action et sa conséquence sont utilisées.(C) Formules de calculs de la liaison selon le type d'élément, l'action ou la conséquence. On retire la mesure de la condition 'baseline' à celle de la condition 'opérante' associée.

L'aspect direct de l'agentivité est quant à lui souvent mesuré par une unique question, recueillant le jugement a posteriori sur l'origine d'une action ou d'une conséquence spécifique. Les mesures directes demandent alors aux participants de réfléchir à leur action et de répondre à des questions telles que "Ai-je fait cela ?" ou "Dans quelle mesure ai-je eu l'impression que mon action a causé cet événement spécifique ?" (par ex., Aarts et al., 2005).

Les recherches ont montré que ces deux types de mesures, reflétant chacune un aspect distinct de l'agentivité, étaient parfois interactives. Elles permettent de mieux comprendre comment le sens de l'agentivité émerge des caractéristiques d'une situation et peut modifier le comportement (Synofzik et al., 2008 ; Dewey & Knoblich, 2014). Bien que ces mesures concernent des événements locaux, les études ont trouvé des corrélations parfois incohérentes, voire inexistantes. Cela rend plus difficiles l'identification précise des indices spécifiques à l'agentivité, ainsi que la génération d'un consensus conceptuel sur les mécanismes cognitifs sous-jacents à l'agentivité.

Dans l'ensemble, les intérêts fondamentaux de cet axe sont de confirmer la notion d'agentivité globale, à travers un outil spécifique, et d'avoir une mesure de l'agentivité facilement utilisable dans une situation d'apprentissage

2.1.2 Étude 1 : Analyses Factorielles de l'échelle de F-SoAS

La SoAS est la première échelle à proposer une mesure de l'agentivité globale. Cependant, elle est actuellement disponible uniquement en hébreu et doit être adaptée dans d'autres langues pour confirmer son modèle à deux facteurs. Par conséquent, l'objectif de cet étude est d'adapter et de valider une version française de la SoAS (la F-SoAS). Basée sur des analyses factorielles exploratoires et confirmatoires, notre étude vise à valider la structure bifactorielle de la F-SoAS, dans un large échantillon d'adultes francophones (N = 517), et à examiner sa fiabilité et sa validité de construction.

De plus, comme nous l'avons vu dans l'introduction, l'agentivité peut être différente selon des facteurs socio-démographiques (par ex., le genre, l'âge, la culture, etc.). La présente étude a pu tester l'un de ces facteurs, celui du genre et rejoint certaines études sur les différences d'agentivité entre hommes et femmes (Jejeebhoy, Acharya, Alexander, Garda, & Kanade, 2010 ; Donald, Koolwal, Annan, Falb, & Goldstein, 2020 ; Valås, 2001). Ainsi, un objectif secondaire en découle, celui de l'étude de l'effet du genre sur les scores du F-SoAS. D'abord, en évaluant si cette mesure de l'agentivité fonctionne de manière similaire entre les genres (en ce qui concerne les perceptions des items et l'équivalence du processus de réponse) et, ensuite, en comparant les scores des femmes et des hommes.

2.1.2.1 Méthode

- **Traduction et adaptation**

Afin d'adapter le matériel original en français, nous avons suivi les normes actuelles de traduction et d'adaptation des tests (Association, Association, et al., 2014 ; Commission et al., 2014). Tout d'abord, nous avons obtenu l'approbation des auteurs pour adapter leur matériel original. Ils ont également fourni des instructions pour nous aider à mieux comprendre comment le SoAS a été construit, et nous aider à le reproduire. Ensuite, deux traductions indépendantes en français ont été préparées par des francophones de langue maternelle ayant une expertise en psychologie. L'objectif était ici de faire correspondre les propriétés sémantiques, conceptuelles et culturelles du matériel source au test cible. Les deux traductions ont ensuite été retraduites par deux autres traducteurs indépendants bilingues (anglais/français). Ensuite, les versions originales et traduites du SoAS sont comparées. Il en est résulté une version préliminaire unifiée qui a été approuvée après discussion par un panel représentatif d'experts dans le domaine. La version française finale ne diffère pas de la version originale en ce qui concerne les titres des items, l'échelle de réponse ou les instructions.

- **Procédure**

L'échelle a été initialement distribuée en ligne, par l'espace numérique de travail de notre université et les groupes Facebook, en utilisant le service Web de notre laboratoire, Epsylab (`https://www.epsylab.fr`). Cependant, afin d'élargir l'échantillon, nous avons décidé de distribuer une version papier de l'échelle à d'autres étudiants de première année de licence de notre université. Pour estimer la cohérence de la mesure (fiabilité), nous avons utilisé une méthode test-retest. Notamment, nous avons demandé au même échantillon de remplir à nouveau le questionnaire, deux mois plus tard.

- **Participants**

Étant donné la nécessité d'utiliser un échantillon assez large pour adapter et valider avec précision un instrument (Gudmundsson, 2009), et la recommandation d'utiliser au moins 10 sujets par item (Kline, 2015 ; Brown, 2015), notre échantillon de convenance était composé de 517 francophones natifs (430 femmes et 87 hommes ; âge moyen de 23,04 ans, ET = 8,7). La plupart étaient étudiants (90,91%), ou avaient obtenu un diplôme d'études secondaires (73,89%). La participation, soit en ligne (224 participants), soit sur papier (293 participants), était volontaire, et les participants ont été informés de la confidentialité et de l'anonymat de leurs données. Afin d'évaluer la stabilité, les participants ayant rempli l'échelle en ligne ont reçu un courriel deux mois plus tard, les invitant à remplir à nouveau l'échelle. Soixante-deux sujets (12% de l'échantillon) ont répondu à cette demande. Il n'y avait aucune incitation à la participation, et les directives éthiques de la déclaration

d'Helsinki ont été suivies. Le seul critère d'exclusion était une réponse incomplète à l'une des questions, ce qui a entraîné l'exclusion de 62 participants (12%).

Tableau 1

Échelle du F-SoAS (traduction française de SoAS - Tapal et al., 2017). ***SoPA*** *: Sens de l'agentivité positive (Sense of Positive Agency);* ***SoNA*** *: Sens de l'agentivité négative (Sense of Negative Agency). Loadings des items selon ces facteurs, après rotation.*

Items du SoAS	SoPA	SoNA
01. Je contrôle complètement ce que je fais.	**.58**	.10
02. Je ne suis qu'un outil entre les mains de quelqu'un ou quelque chose.	.20	**.27**
03. Mes actions se produisent sans que j'en ai l'intention.	.17	**.55**
04. Je suis l'auteur de mes actions.	**.40**	.20
05. Les conséquences de mes actions ne semblent pas suivre mes actions de façon logique.	.15	**.36**
06. Mes mouvements sont automatiques - mon corps les fait simplement.	−.32	**.48**
07. De façon générale, le résultat de mes actions me surprend.	.09	**.48**
08. Ce que je fais n'est soumis qu'à mon libre arbitre.	**.67**	−.07
09. La décision d'agir ou non, ainsi que le moment d'agir, est entre mes mains.	**.61**	.03
10. Rien de ce que je fais n'est vraiment volontaire.	.23	**.31**
11. Lorsque j'agis, j'ai l'impression d'être un robot télécommandé.	−.06	**.49**
12. Je planifie mon comportement du début jusqu'à la fin.	**.26**	.04
13. Je suis totalement responsable de tout ce qui résulte de mes actions.	**.45**	.06
SS loading/Eigenvalue	**1.91**	**1.45**
Variance cumulée	**.15**	**.11**

- **Mesures**

La version française du SoAS à 13 items (F-SoAS) a été utilisée dans notre étude. Selon la structure factorielle originale, l'agentivité globale est divisée en deux facteurs, SoPA (sentiment de contrôle), et SoNA (sentiment d'impuissance existentielle). La réponse à chaque item a été enregistrée sur une échelle de Likert à 7 items allant de 1 (fortement en désaccord) à 7 (fortement d'accord). La traduction du SoAS se trouve dans le tableau 1. En outre, les participants ont fourni des informations socio-démographiques (genre, âge et niveau d'étude).

2.1.2.2 Analyses statistiques

L'échantillon global a été divisé au hasard en deux sous-échantillons indépendants. Le premier (N = 259) a été utilisé pour effectuer une analyse factorielle exploratoire (AFE). Le second (N = 258) a été utilisé pour tester le modèle de mesure par une analyse factorielle confirmatoire (AFC).
Enfin, nous avons utilisé l'échantillon complet (N = 517) pour analyser la validité, la stabilité et l'équivalence du construit mais également les différences entre les genres sur les scores du F-SoAS.
L'AFE et l'AFC ont été exécutées à l'aide des packages R "psych" (Revelle, 2015) et "lavaan" (Rosseel, 2012). Les vérifications de la validité, la stabilité, l'équivalence et des différences entre les genres ont été effectuées à l'aide de JASP version 0.11.1.

•Analyse Factorielle Exploratoire (AFE)
Afin de déterminer la pertinence de l'AFE pour le premier échantillon aléatoire (N = 259), nous avons appliqué le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) d'adéquation de l'échantillon, et le test de Bartlett de sphéricité. La valeur KMO indique le rapport entre la corrélation au carré pour la somme des variables et la corrélation partielle au carré (Field, 2009). La statistique KMO est comprise entre 0 et 1. Une valeur de 0 indique que la somme des corrélations partielles est importante par rapport à la somme des corrélations, ce qui indique une diffusion ; par conséquent, il est peu probable qu'une analyse factorielle soit appropriée. Une valeur proche de 1 indique que les modèles de corrélations sont relativement compacts et qu'une analyse factorielle devrait produire des facteurs distincts et fiables. La limite inférieure acceptable est de .50 (Field, 2009). Le test de sphéricité de Bartlett examine l'hypothèse nulle selon laquelle les variables de la matrice de corrélation de la population ne sont pas corrélées. Une valeur p significative indique que les variables (c.-à-d., les items) sont suffisamment liées et donc appropriées pour une analyse plus approfondie.

Le test de Mardia (1974) a été appliqué pour évaluer la probabilité que l'échantillon soit tiré d'une population multinormale. Une valeur p significative indique une déviation de la normalité et, dans ce cas, la factorisation par axe principal, plutôt que le maximum de vraisemblance, devrait être utilisée comme estimateur. Une analyse parallèle a été effectuée afin d'identifier la meilleure solution factorielle, basée sur la valeur propre des données réelles étant plus élevée que la valeur propre aléatoire correspondante (Horn, 1965).

Dans un deuxième temps, l'AFE a été appliquée à l'échantillon, avec une rotation oblique (OBLIMIN), pour vérifier la structure factorielle sous-jacente du F-SoAS à 13 items. La rotation oblique est utilisée lorsque l'on peut supposer que les facteurs sous-jacents sont corrélés entre eux. Une saturation de .40 sur un facteur et une différence de .30 avec les saturations des autres facteurs sont utilisées comme seuil d'inclusion (O'connor, 2000).

• **Analyse Factorielle Confirmatoire (AFC)**

Comme pour l'AFE, le test de Mardia a été effectué pour évaluer si le second échantillon aléatoire (N = 258) était susceptible d'être tiré d'une population multinormale. En effet, l'AFC serait menée sur un sous-ensemble différent, et le modèle proposé par l'AFE pourrait changer l'ensemble des variables (en raison des éléments supprimés). Comme indiqué ci-dessus, une valeur p significative, indiquant une déviation de la normalité, nécessite l'utilisation de l'estimateur du maximum de vraisemblance.

L'AFC a été menée sur ce sous-ensemble pour confirmer le modèle de la F-SoAS identifié par l'AFE. Selon Hu et Bentler (1999), un modèle présente un ajustement adéquat lorsque : (1) l'erreur d'approximation quadratique moyenne (RMSEA $\leq$ .06) (2) le résidu quadratique moyen normalisé (SRMR $\leq$ .08) et (3) l'indice d'ajustement comparatif (CFI) et l'indice de Tucker-Lewis (TLI $\geq$ .95).

Il convient de noter que ces critères ne constituent qu'une ligne directrice et que des valeurs proches des normes peuvent être acceptées (Bollen, 1989) ; par exemple, un CFI-TLI $>$ .90 ou un RMSEA jusqu'à .10 (Kenny, Kaniskan, & McCoach, 2015).

• **Validité du construit**

La validité de la structure factorielle a été évaluée, sur l'échantillon complet (N = 517), en examinant la charge factorielle standard (SFL) pour chaque item, ainsi que la fiabilité composite (CR) et la variance moyenne extraite (AVE) (Raubenheimer, 2004). En ce qui concerne le SFL, le seuil de saturation factorielle de chaque item avec son échelle a été fixé à .50 (Hair, Black, Babin, Anderson, & Tatham, 2006). Concernant l'indice CR, nous avons calculé l'alpha de Cronbach mais surtout les coefficients ω de Raykov, $\omega 2$ de Bentler et $\omega 3$ de McDonald, qui se sont avérés beaucoup plus efficaces (Trizano-Hermosilla & Alvarado, 2016). La plupart des auteurs recommandent que le CR soit supérieur à .70, bien que .60 soit considéré comme suffisant (Carlson & Herdman, 2012). Enfin, l'AVE doit être supérieur à .50 (Fornell & Larcker, 1981).

• **Stabilité du construit**

La stabilité de la structure factorielle a été calculée sur l'échantillon complet (N = 517), à l'aide d'une analyse test-retest, sur la base des 62 sujets ayant rempli le questionnaire une seconde fois, deux mois plus tard. Pour cette analyse, nous avons utilisé les indices suivants : 1) Le coefficient de corrélation intraclasse (ICC3k). Il évalue les effets mixtes à deux voies basés sur les moyennes de mesures multiples et sur la concordance absolue. La stabilité est bonne lorsqu'elle est supérieure à .75 (Koo & Li, 2016) ; 2) Les tests t appariés et les corrélations de Pearson pour chaque facteur entre la première réponse (T0) et la deuxième réponse (T1).

• **Équivalence du construit entre les genres**

Les comparaisons entre groupes doivent être interprétées avec prudence, et il est important de tenir compte des implications de l'invariance de la mesure. Cette mesure fait référence à la mesure dans laquelle le contenu de chaque item est perçu et interprété de la même manière à travers les échantillons (Byrne & Watkins, 2003). Si ce facteur n'est pas contrôlé, les comparaisons entre groupes risquent d'être trompeuses et potentiellement artéfactuelles. Ce n'est que lorsqu'il est contrôlé que des comparaisons significatives de statistiques (telles que les moyennes) peuvent être effectuées.

L'équivalence de structure a été estimée sur l'échantillon complet (N = 517), en utilisant l'invariance de mesure. Cela permet de comparer de manière significative des ensembles de données collectées dans des groupes ou des contextes socioculturels différents. Tout d'abord, nous avons évalué la structure interne du modèle de mesure chez les femmes et les hommes, indépendamment. Pour cela, l'AFC individuelle et l'estimateur du maximum de vraisemblance avec erreurs standard robustes (MLR) ont été exécutés sur l'échantillon de femmes (N = 430) et d'hommes (N = 87).

Deuxièmement, nous avons testé l'invariance de mesure en utilisant une série d'étapes hiérarchiques, basées sur des modèles CFA multigroupes. Le processus commence par l'établissement d'un modèle de base dans chaque groupe, suivi de tests d'équivalence entre les groupes à des niveaux de plus en plus restreints. La première étape (invariance configurale), vise à vérifier si chaque groupe a le même nombre de dimensions, et les mêmes modèles de paramètres fixes et libres (Bollen, 1989). L'étape suivante vise à évaluer si les charges factorielles des variables latentes (c.-à-d., l'invariance faible) sont également invariantes entre les groupes. Si cette condition est vérifiée, l'étape suivante consiste à tester si les intercepts (c.-à-d., l'invariance forte), puis les résidus (c.-à-d., l'invariance stricte) et, enfin, les moyennes, variances et covariances des variables latentes (c.-à-d., l'invariance structurelle) sont invariants entre les groupes.

L'évaluation a été faite à l'aide du test le plus utilisé, celui du chi^2 (Cochran, 1952). Une différence non significative (p > .05) entre un modèle moins et plus contraint indique que la nouvelle contrainte ne dégrade pas la qualité de l'ajustement. En d'autres termes, l'hypothèse d'invariance entre groupes reste plausible au niveau le plus fin d'observation susceptible de varier. En outre, nous avons utilisé le critère d'information bayésien (BIC) et le critère d'information d'Akaike (AIC) pour comparer l'ajustement relatif des modèles (Wicherts et al., 2004). Un BIC/AIC plus faible indique un meilleur compromis entre l'ajustement du modèle et sa complexité.

• **Différences entre les genres dans les scores F-SoAS**

Les différences de genre entre les scores F-SoAS ont été examinées sur l'échantillon complet (N = 517), en utilisant une ANOVA. D'abord, pour le F-SoAS en tant que score global, puis pour les scores de chaque facteur du F-SoAS, SoPA et SoNA, avec le genre comme facteur inter-sujets.

2.1.2.3 Résultats

• **EFA**

La statistique KMO pour le premier échantillon aléatoire (N = 259) était de .78, ce qui est acceptable, et les valeurs pour chaque élément individuel étaient supérieures au seuil de .50. Concernant le test de Bartlett, le chi^2 approximatif était significatif, $\chi 2$(78, N = 259) = 493.16 et p < .001, indiquant, comme le KMO, que la matrice de corrélation était adaptée à la détection des facteurs. Comme le test de Mardia était statistiquement significatif pour l'asymétrie et l'aplatissement (asymétrie de Mardia = 25.72, $\chi 2$(455, N = 259) = 1110.19, p < .001 ; aplatissement de Mardia = 224.63, Z = 12.07, p < .001), nous avons utilisé la factorisation de l'axe principal pour effectuer l'AFE.

L'analyse parallèle de l'EFA a suggéré une solution à deux facteurs, car la valeur propre des données réelles était supérieure à la valeur propre aléatoire correspondante (voir figure 17). L'AFE a été réalisée sur une solution à deux facteurs (voir tableau 1). Par conséquent, pour le facteur 1 (SoPA), et conformément aux critères d'inclusion des items, nous avons retiré l'item 4 (cross-loading < .30) et l'item 12 (loading < .40). Pour le facteur 2 (SoNA), nous avons retiré l'item 2 (loading < .40), l'item 5 (loading < .40), l'item 6 (cross-loading < .30) et l'item 10 (loading < .40). Nous avons ainsi obtenu une échelle à 7 items, dont 4 items se rapportent au facteur SoPA et 3 items au SoNA.

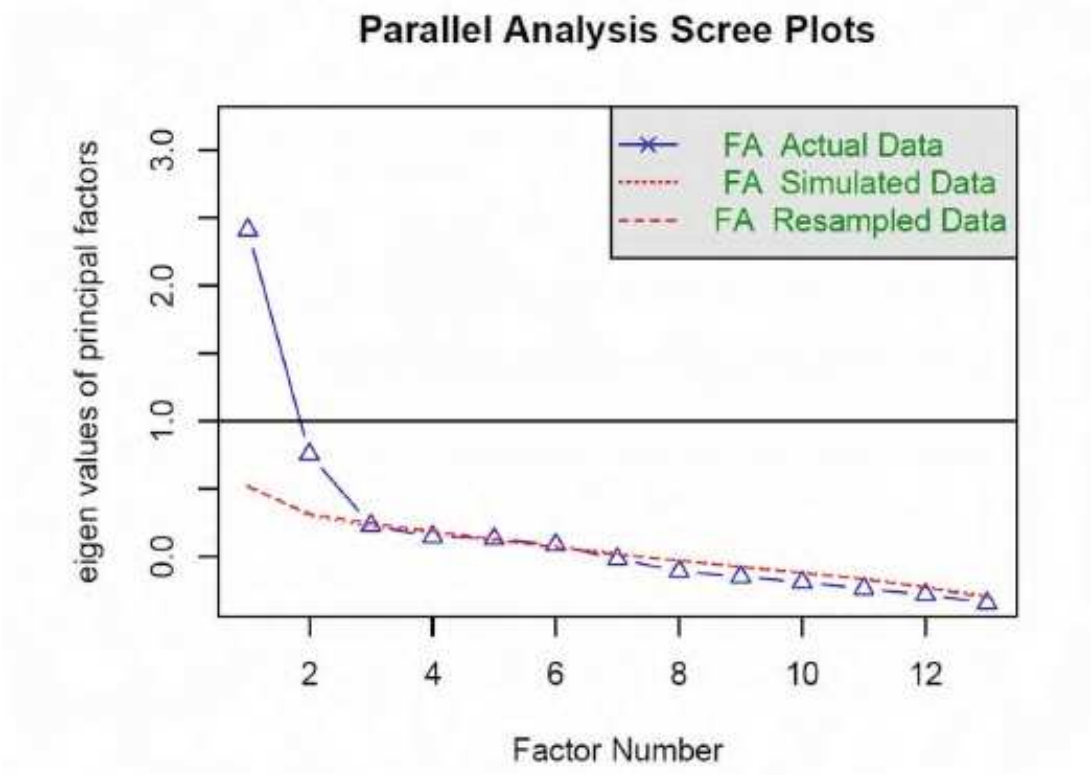

FIGURE 17 – Résultats de l'analyse parallèle montrant le numéro du facteur sur l'axe horizontal et la valeur propre sur l'axe vertical. Les valeurs propres pour les données réelles étaient 2,41 [0,52], 0,75 [0,31], 0,23 [0,24], 0,14 [0,18], 0,13 [0,12], 0,08 [0,08], -0,02 [0,02], -0,11 [-0,03], -0,15 [-0,08], -0,19 [-0,11], -0,24 [-0,17], -0,28 [-0,25], -0,35 [-0,31], les valeurs propres aléatoires correspondantes sont indiquées entre parenthèses.

- **CFA**

En ce qui concerne le second échantillon aléatoire (N = 258), le test de Mardia était statistiquement significatif pour l'asymétrie et l'aplatissement (asymétrie de Mardia = 26.16, $\chi 2(455, N = 258) = 1124.97$, $p < .001$; aplatissement de Mardia = 226.34, Z = 12.75, $p < .001$). Par conséquent, l'AFC était basée sur l'estimateur MLR (Satorra et Bentler, 1994). Le modèle identifié par l'AFC s'ajustait adéquatement aux données : $\chi 2(21, N = 258) = 13.503$, $p = 0.41$; CFI = .997 ; TLI = .996 ; RMSEA = .013 (90% CI = .000, .069) et SRMR = .040. La covariance entre les facteurs était de = 0,556 ($p <$ .001). Ainsi, chaque indice était conforme aux critères. Par conséquent, nous avons conclu que le modèle était un ajustement adéquat à nos données (voir l'analyse statistique pour les détails des critères). La figure 18 montre le diagramme du modèle avec les estimations des paramètres.

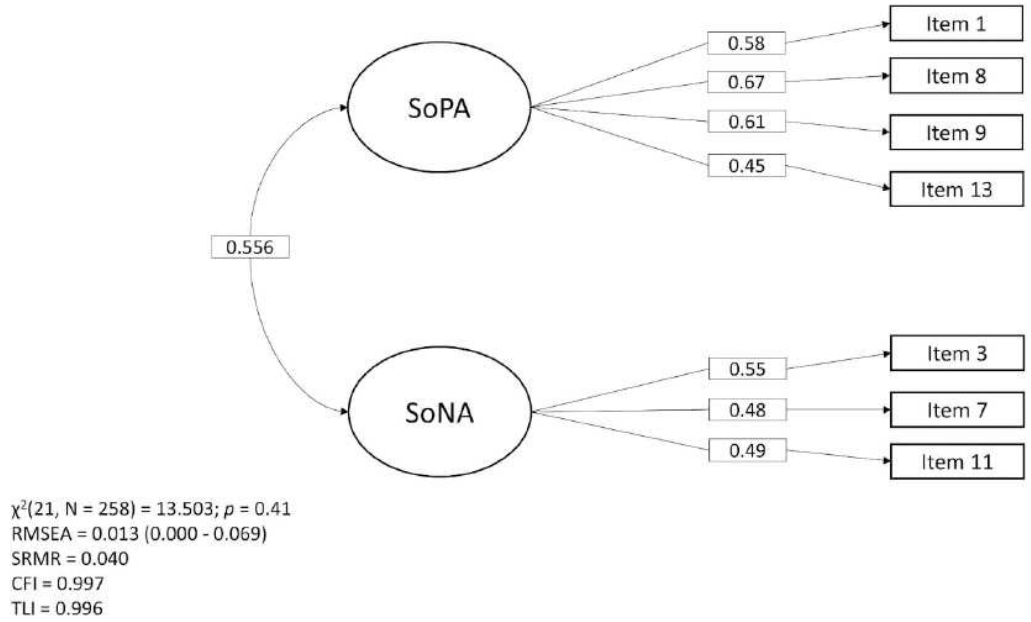

FIGURE 18 – La structure et les paramètres du modèle confirmatoire à deux facteurs. SoPA, Sense of Positive Agency ; SoNA, Sense of Negative Agency. La figure présente (de gauche à droite) la corrélation entre les deux variables latentes et les résidus standardisés. Les variances des deux variables latentes ont été contraintes à 1.

- **Validité du construit**

Pour l'échantillon complet (N = 517), le test de Mardia était statistiquement significatif pour l'asymétrie et l'aplatissement (asymétrie Mardia = 26.16, $\chi 2(455, N = 517) = 1124.97$, $p < .001$; aplatissement Mardia = 226.34, Z = 12.75, $p < .001$). Le SFL était supérieur à .50 pour tous les items, sauf pour l'item 7 (SFL = .49), l'item 11 (SFL = .44) et l'item 13 (SFL = .44), qui étaient à la limite. En ce qui concerne les valeurs du CR, le coefficient alpha de Cronbach a été calculé pour chaque facteur, et les valeurs étaient de .64 pour le SoPA et de .55 pour le SoNA. La valeur alpha globale pour l'ensemble du SoAS était de .66 (supérieure au seuil de .60). Cette valeur était également supérieure au seuil pour le facteur SoPA, mais pas pour le facteur SoNA, ce qui indique une fiabilité moyenne. L'oméga de McDonald était $\omega 3 = .65$ pour le SoPA et $\omega 3 = .53$ pour le SoNA. Ce résultat était supérieur au seuil (.60) pour le SoPA, mais pas pour le SoNA. Ni l'indice alpha ni l'indice oméga n'étaient supérieurs au seuil de .70, indiquant une fiabilité insuffisante. De même, l'AVE de chaque facteur n'a pas dépassé le seuil (.50), indiquant une validité de construction insatisfaisante (SoPA : AVE = .32 ; SoNA : AVE = .32).

- **Stabilité du construit**

En ce qui concerne l'analyse test-retest, les scores totaux n'ont pas changé de manière significative au cours de la période de deux mois [t(61) = -0.40 ; p = .69], avec une moyenne de 35,55 (ET = 5,62) pour la première mesure et 35,77 (ET = 5,53) pour la seconde. L'ICC était de 0,82 (p < .001), ce qui indique une bonne stabilité test-retest. Les scores SoPA sont également restés stables au cours de la période [t(61) = -1,19 ; p = .24] avec des moyennes de 18,53 (ET = 4,12) pour la première mesure et de 19,05 (ET = 3,92) pour la seconde. L'ICC était de .78 (p < .001), ce qui indique une bonne stabilité test-retest. Les scores SoNA sont également restés stables au cours de la période [t(61) = -0,86 ; p = .39] avec des moyennes de 6,98 (ET = 2,79) pour la première mesure et de 7,27 (ET = 2,88) pour la seconde. L'ICC était de .72 (p < .001), ce qui indique une bonne stabilité test-retest. De plus, les corrélations de Pearson étaient de r = .69 (p < .001) pour le score total du F-SoAS, de r = .64 (p < .001) pour le SoPA et de r = .56 (p < .001) pour le SoNA. Dans l'ensemble, notre analyse de fiabilité soutient l'interprétation selon laquelle la F-SoAS estime effectivement l'agentivité transsituationnelle des personnes et non l'agentivite locale, dépendante de la situation.

- **Équivalence du construit entre les genres**

Concernant l'échantillon féminin, le test de Mardia était statistiquement significatif pour l'asymétrie et l'aplatissement (asymétrie Mardia = 19.86, χ^2(455, N = 430) = 1422.99, p < .001 ; aplatissement Mardia = 227.90, Z = 17.27, p < .001). Ainsi, l'AFC était basée sur l'estimateur MLR. Le modèle a ajusté l'échantillon féminin de manière adéquate : χ2(13, N = 430) = 20,470, p = .084 ; CFI = .975 ; TLI = .954 ; RMSEA = .037 (90 % CI = .000 ; .064) et SRMR = .038. La covariance inter-facteurs était de 0,443 (p < .001). Comme chaque indice était satisfaisant, nous avons conclu que le modèle était un ajustement adéquat à l'échantillon féminin. Concernant l'échantillon masculin, le test de Mardia était statistiquement significatif pour le skewness et le kurtosis (Mardia skewness = 56.89, χ^2(455, N = 87) = 824.98, p < .001 ; Mardia kurtosis = 216.24, Z = 5.02, p < .001). Ici encore, l'AFC était basée sur l'estimateur MLR. Le modèle a ajusté l'échantillon masculin de façon adéquate : χ2(13, N = 87) = 20.367, p = .086 ; CFI = .933 ; TLI = .891 ; RMSEA = .082 (90% CI = .000 ; .147) et SRMR = .062. La covariance inter-facteurs était de .747 (p = .002). Dans ce cas, presque tous les indices étaient satisfaisants ; les exceptions étaient le TLI et la RMSEA, qui étaient très proches. Nous avons donc conclu que le modèle s'adapte bien à l'échantillon masculin. L'étape suivante a consisté à évaluer l'invariance des mesures. Les résultats sont présentés dans le tableau 2. Le premier point à noter est que, à l'exception du modèle structurel, plus le modèle est contraint, plus l'AIC et le BIC diminuent, et le meilleur ajustement a été observé pour la structure à deux facteurs du F-SoAS.

Deuxièmement, la valeur p était non significative pour chaque test d'invariance, à l'exception du modèle structurel qui est, il faut le noter, une condition assez exigeante et rarement atteinte dans la pratique (Gana & Broc, 2019). Par conséquent, en dehors de cette considération, on peut affirmer que l'hypothèse d'équivalence du modèle de mesure entre les genres est démontrée.

Tableau 2

Mesure de l'invariance entre les sexes.

	χ^2_{SB}	Df	AIC	BIC	$\Delta\chi^2_{SB}$	ΔDf	*p-valeur*
Configural	43.32	26	12161	12348	–	–	–
Faible	46.84	31	12154	12320	3.16	5	.67
Forte	53.60	36	12151	12295	6.87	5	.23
Stricte	64.17	43	12148	12262	5.47	7	.60
Structural	80.76	48	12154	12248	16.29	5	.01*

L'estimateur MLR est utilisé. Note : χ^2_{SB} = Chi-carré selon l'échelle de Satorra-Bentler ; AIC = critère d'information d'Akaike ; BIC = critère d'information bayésien.

- **Différences entre les genres**

Nous avons trouvé un effet significatif du genre par rapport au score global, avec F(1) = 8,77, p = .003 et $\eta 2$ = .02. En ce qui concerne les facteurs individuels, les résultats montrent un effet significatif du genre pour le SoPA, avec F(1) = 4,07, p = .04, et $\eta 2$ = .01 et le SoNA, avec F(1) = 9,12, p = .003, et $\eta 2$ = .02. Les femmes ont obtenu des résultats inférieurs à ceux des hommes, tant pour le score global (femmes = 36,16 ±5,89 ; hommes = 38,10 ±5,98) que pour le SoPA (femmes = 19,44 ±4,06 ; hommes = 20,43 ±4,47), mais supérieurs à ceux des hommes pour le SoNA (femmes = 7,28 ±2,74 ; hommes = 6,32 ±2,51).

2.1.2.4 Discussion

Le principal objectif de cette première étude était de traduire et valider une version française du SoAS, appelé F-SoAS, afin de pouvoir étudier le sens de l'agentivité de façon globale et explorer les liens entre ce trait individuel et l'apprentissage. Cette première validation dans une autre langue que celle originale devrait également permettre de faciliter de futures études pour confirmer la validité de cette structure pour l'agentivité globale. Un objectif secondaire était de tester les différences de genre parmi les scores du F-SoAS.

Nos résultats montrent que le F-SoAS a d'assez bonnes propriétés psychométriques. En effet, le modèle présente un très bon ajustement, des saturations acceptables à bonnes, une fiabilité test-retest et une équivalence structurelle entre les genres. Les résultats de l'EFA et de l'AFC sont conformes au modèle de mesure à deux facteurs validé par Tapal et al. (2017), ce qui appuie fortement l'idée que l'agentivité globale est multidimensionnelle. Malgré ces résultats, le faible niveau de variance expliquée (28% au total, 15% pour la SoPA et 11% pour la SoNA ; voir le tableau 1) et la faible validité de construit indiquent des erreurs de mesure. Par conséquent, l'échelle ne capture pas encore suffisamment de variances et doit être améliorée. À la suite de l'EFA, nous avons retiré cinq items de l'échelle SoAS originale de 13 items, en raison de saturations insuffisantes. Nous avons obtenu une forme courte avec la F-SoAS, dans laquelle chaque dimension comporte au moins le nombre minimum de trois items. Cette réduction de l'échelle à 7 items est bénéfique, car elle devient plus facile à intégrer dans les études de recherche et les questionnaires, et moins complexe à analyser. De plus, les intercorrélations entre les facteurs du F-SoAS sont conformes à celles rapportées par Tapal et al. (2017). La corrélation négative faible à modérée entre le SoPA et le SoNA suggère que les deux facteurs ne mesurent pas le même construit, mais plutôt des aspects différents du même construit.

Concernant l'invariance de structure du F-SoAS, les résultats soutiennent l'idée que l'échelle peut être utilisée et interprétée de manière similaire entre les genres. En ce qui concerne l'effet du genre sur les scores F-SoAS, notre analyse démontre l'équivalence du modèle de mesure entre les genres. Cela indique que les hommes et les femmes interprètent l'échelle de la même manière, et mobilisent un processus de réponse comparable. Pourtant les femmes obtiennent un score plus faible pour le SoPA (c.-à-d., le jugement d'avoir le contrôle) et plus élevé pour le SoNA (c.-à-d., l'impuissance existentielle) que les hommes. Ces résultats pourraient être dus au fait que moins d'hommes que de femmes ont participé à l'étude, ce qui a entraîné une puissance moindre lors de l'analyse des hommes. Cependant, malgré la petite taille de l'effet, nos résultats sont conformes aux études précédentes sur l'effet du genre sur l'agentivité (Donald et al., 2020). D'autres études restent nécessaires pour confirmer cet effet.

Dans l'ensemble, nos résultats soutiennent une conceptualisation de l'agentivité comme un construit complexe et multidimensionnel qui peut être mesuré selon un niveau global au travers de cette nouvelle mesure. Nous discuterons des limites de cette étude au travers de la discussion générale. Notons que nous ne connaissons pas encore les liens qu'il peut exister entre cette nouvelle mesure et les différentes mesures actuelles de l'agentivité. Ce qui amène à se questionner sur les mécanismes communs qu'elles pourraient partagées.

ÉTUDE 1

Résumé : Afin de pouvoir étudier le sens de l'agentivité de façon globale et explorer les liens entre ce trait individuel et l'apprentissage, nous avons traduit en français l'unique échelle renvoyant vers cette notion. Les objectifs étaient doubles : avoir une version française de l'échelle, exploitable pour de futures études et confirmer la structure conceptuelle de l'agentivité globale à deux facteurs (SoPA et SoNA). Les analyses factorielles exploratoires et confirmatoires, effectuées auprès de 517 participants, valident l'échelle en langue française (F-SoAS) et sa structure. En outre, le nombre réduit d'item validé a permis de la simplifier l'échelle tout en gardant la même pertinence. Enfin,elle ouvre des portes pour diverses études à venir portant sur les différences de genre dans l'agentivité.

⟶ **Valorisation :** Article original publié dans le journal "Frontiers in Psychology" - *Measuring the Sense of Agency : A French Adaptation and Validation of the Sense of Agency Scale (F-SoAS)* - Auteurs : J.-C. Hurault, G. Broc, L. Crône, A. Tedesco et L. Brunel, 2020)
`https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.584145`

■

2.1.3 Étude 2 : Validité externe de l'échelle F-SoAS

Cette deuxième étude va permettre de tester une nouvelle validation de l'échelle afin de pouvoir conclure sur sa validité externe. C'est-à-dire que l'on a étudié les liens entre l'échelle d'agentivité F-SoAS et d'autres mesures d'agentivité, déjà validée et régulièrement utilisée. La mesure principale est indirecte, il s'agit de l'effet de liaison intentionnelle (Haggard et al., 2002 ; Moore & Obhi, 2012). Pour cette étude, nous nous sommes concentrés sur la mesure de cet effet au travers du paradigme de l'horloge de Libet (expliqué en détail dans la partie méthode). Cela nous permet de mesurer la force de la liaison intentionnelle de façon générale, appelée liaison totale, mais également dans ses composantes individuelles, la liaison d'action et la liaison de conséquence. Dans le cadre théorique de l'agentivité utilisé ici, à savoir l'approche intégrative (Synofzik et al., 2008, 2013), cette distinction est importante. Selon celui-ci, la compression de l'intervalle temporel perçu entre une action volontaire et sa conséquence sensorielle résulterait de l'utilisation des deux événements comme indices temporels (Synofzik et al., 2013 ; Haggard, 2017). Il convient de noter que la force de la liaison va également être déterminée par la variabilité relative des estimations (par ex., Wolpe, Haggard, Siebner, & Rowe, 2013). Une mesure unique sur la liaison totale pourrait masquer des schémas importants. À titre d'exemple, une forte liaison d'action associée à une faible liaison de conséquence serait indiquée de la même façon qu'une faible liaison d'action associée à une forte liaison de conséquence. Or, ils reflètent des mécanismes cognitifs différents, pouvant être liés de diverses façons au niveau d'agentivité globale reflété par l'échelle de F-SoAS.

Concernant la liaison d'action, d'un côté, elle est modulée par des processus postdictifs (ou inférentiels), car elle se produit même lorsque l'action n'est pas fortement prédictive d'une conséquence, tant qu'elle se produit (Moore & Haggard, 2008). De l'autre, elle est modulée par des processus prédictifs, car lorsque l'action est hautement prédictive d'une conséquence, la liaison d'action se produit même pour les essais dans lesquels les conséquences sont absentes. Ces deux processus sont soutenus de manière significative par la relation de contingence ou de causalité entre l'action et la conséquence (Moore et al., 2009), ce qui suggère un rôle critique de l'apprentissage d'associations action-conséquence. Elle combine les informations sur le moment de réalisation de l'action avec d'autres informations, liées à ses conséquences sensorielles. Selon le modèle de Synofzik et al. (2013), les informations sur le moment de l'action volontaire pourraient s'appuyer sur des indices sensorimoteurs internes (prédictions sensorielles, copie efférente, etc.), appelés "priors" sensorimoteurs. Lorsque l'incertitude sensorielle est élevée ou en l'absence de retour sensoriel, la perception de l'action s'appuie davantage sur ces priors, réduisant l'influence des indices cognitifs (interne, comme les croyances, ou externes, comme les informations sur l'environnement) et des mécanismes postdictifs (Moore & Obhi, 2012).

Concernant la liaison de conséquence, elle partage certains mécanismes sous-jacents à la liaison d'action. Elle dépend de processus prédictif, une conséquence d'action volontaire, est activée avant sa survenue par les mécanismes d'apprentissage sensorimoteur. En raison de ce processus prédictif, lorsque la conséquence prédite se produit, elle est perçue plus tôt que lorsqu'elle n'est pas prédite. Par conséquent, les erreurs d'estimation sont plus petites dans la condition opérante de conséquence qu'elles ne le sont dans la condition baseline de conséquence, ce qui conduit à la liaison de conséquence (Waszak et al., 2012). Qui plus est, elle est liée à des processus postdictifs, car elle ne dépend pas de l'établissement d'une association action-conséquence spécifique (Desantis et al., 2012). Des études récentes ont montré des modulations spécifiques de chaque liaison, pouvant indiquer qu'elles sont dirigées par des mécanismes proches, mais distincts (Moore, Ruge, Wenke, Rothwell, & Haggard, 2010 ; Wolpe et al., 2013). Nous avons choisi de compléter cette mesure indirecte par une mesure secondaire directe de l'agentivité, en utilisant un jugement sur le ressenti de causalité (Wegner & Wheatley, 1999). Cette mesure renvoie au jugement d'agentivité et permet de refléter les croyances causales, les connaissances a priori sur l'environnement et le contexte, mais est également influencée par le sentiment d'agentivité associé.

Ces deux mesures permettent d'estimer des niveaux d'agentivité théoriquement corrélés, mais distincts, du niveau d'agentivité mesuré par l'échelle. En effet, tandis que la mesure indirecte va plutôt refléter le niveau sensorimoteur de l'agentivité, la mesure directe va-t-elle refléter le niveau cognitif. Pourtant, ces deux mesures reposent sur une agentivité locale, associée à une expérience particulière. L'échelle d'agentivité globale (F-SoAS) devrait quant à elle refléter une agentivité plus générale et potentiellement regroupant l'influence de l'ensemble des expériences particulières d'agentivité. Bien que distincts, ces différents niveaux d'agentivité devraient reposer sur des mécanismes communs associés au sens de l'agentivité. L'échelle F-SoAS, comprend le facteur d'agentivité globale positive (SoPA) qui représente le niveau de contrôle sur le corps, l'esprit et l'environnement ressenti par un individu. Pour autant, elle comprend également le facteur opposé, mais distinct, d'agentivité globale négative (SoNA) qui représente le manque de contrôle ressenti par un individu, associé à l'impuissance apprise.

Comme nous l'avons formulé plus haut, le sens de l'agentivité renvoie à l'intégration de différents niveaux d'agentivité, qu'ils soient sensorimoteurs ou cognitifs, reposant sur des mécanismes prédictifs et postdictifs. Nous avons émis l'hypothèse que les différentes mesures de l'agentivité dépendent en partie des mêmes processus, impliquant que le jugement d'agentivité, la liaison intentionnelle et le trait individuel d'agentivité devraient être corrélés entre eux. Il existe toutefois plusieurs alternatives. Par exemple, les jugements d'agentivité pourraient être davantage influencés par des inférences postdictives et moins par des processus prédictifs involontaires par rapport à la liaison intentionnelle. Cela permettrait de prévoir des corrélations différentes entre les facteurs du F-SoAS.

En résumé, cette deuxième étude analyse la relation entre les facteurs du trait individuel d'agentivité globale (SoPA et SoNA), l'effet de liaison intentionnelle et le jugement d'agentivité. Par elle, nous avons cherché à mieux connaître les processus sensorimoteurs et cognitifs associés à ce trait d'agentivité.

De plus, l'effet de liaison intentionnelle ayant été retrouvé en utilisant des dispositifs de réalité virtuelle (par ex., Kong, He, & Wei, 2017 ; Winkler, Stiens, Rauh, Franke, & Krems, 2020), nous avons réalisé ce paradigme au sein d'un environnement virtuel. Au-delà de la perspective d'améliorer notre prise en main du dispositif et de disposer d'un paradigme facilement reproductible, cela nous a permis d'alimenter notre réflexion sur les perspectives de la RV sur l'agentivité, discuté dans la dernière partie de cette thèse.

2.1.3.1 Méthode

- **Participants**

Trente-deux participants (15 femmes) de l'Université Montpellier III (Montpellier, France) ont donné leur consentement écrit. Ils étaient d'âge moyen de 26,7 ans (ET = 5,7). Tous étaient droitiers, avaient une vision normale ou corrigée à la normale, aucun problème de motricité, aucun antécédent d'épilepsie et aucune ou très peu d'expérience de la réalité virtuelle.

La taille de l'échantillon nécessaire a été estimée en reprenant les critères d'une autre étude comparant plusieurs mesures d'agentivité par corrélations. Cependant, la présente étude n'utilisant pas de variable inter-sujet, contrairement à celle de Dewey et Knoblich (2014), nous avons donc collecté les données de 34 participants, mais les résultats de deux d'entre eux ont subi des problèmes sur l'enregistrement des données et ont été retirés. La procédure était conforme au Code d'éthique de l'Association médicale mondiale (la Déclaration d'Helsinki).

- **Procédure et Matériels**

Chaque participant a d'abord effectué la tâche de liaison intentionnelle dans l'environnement virtuel qui a été accompagnée d'une mesure directe de l'agentivité lors de la tâche de liaison intentionnelle. Pendant cette tâche, les participants portaient donc un HMD et se trouvaient dans une pièce virtuelle, identique à la pièce expérimentale réelle où se trouvait le participant (voir figure 19). Les participants étaient assis à un bureau de manière à pouvoir y poser confortablement leurs mains. Le bureau virtuel était aligné avec le bureau réel situé devant le participant. Ils utilisaient des contrôleurs HTC Vive pour interagir, un visible (dans leur main dominante) pour effectuer l'action volontaire dans la tâche de liaison intentionnelle et un contrôleur invisible dans l'autre main, pour effectuer les autres actions (par ex., valider les instructions, lancer l'essai, rapporter le jugement, etc.). Il était demandé aux participants de garder les contrôleurs dans leur main pendant l'expérience et de toujours garder leur index droit sur le bouton du contrôleur. Une fois la tâche finie, les participants ont quitté l'environnement virtuel et rempli l'échelle d'agentivité F-SoAS. La durée totale de l'expérience était d'environ 45 minutes.

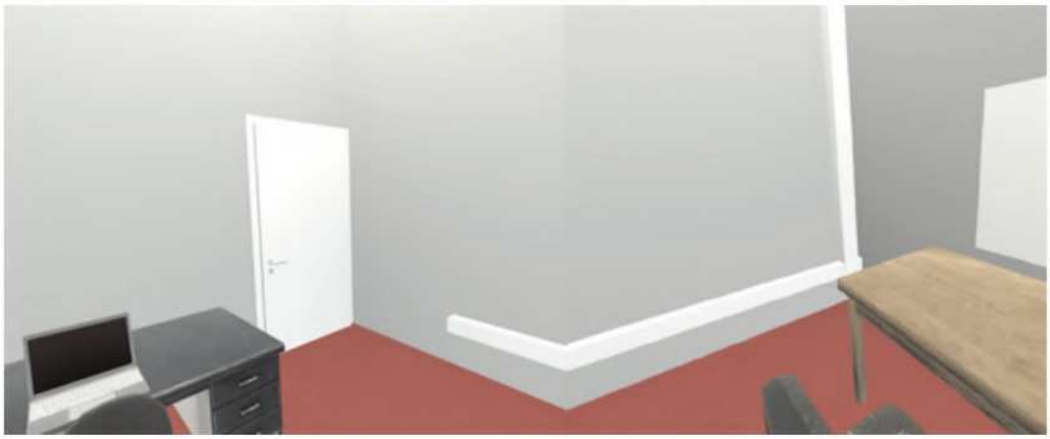

FIGURE 19 – L'environnement virtuel créé pour l'étude 2

- **Mesures**

Tâche de liaison intentionnelle :

L'effet de liaison intentionnelle a été mesuré en utilisant le paradigme classique de l'horloge de Libet. Assis à leur bureau, portant le HMD, les participants devaient fixer le cadran d'une horloge virtuelle (voir figure 20). L'horloge avait une aiguille de 1,2 cm de long, qui tournait avec une période de 2560 ms par cercle. Le cadran de l'horloge était marqué par des intervalles conventionnels de "5 minutes", à l'exception de la marque supérieure "0/60". La position initiale de l'aiguille de l'horloge était aléatoire entre l'une des 12 marques. La rotation de l'horloge commençait lorsque le participant appuyait sur la gâchette du contrôleur invisible, avec sa main gauche.

Dans la condition opérante, les participants appuient sur un bouton du contrôleur visible avec leur index droit à un moment de leur choix, ce qui produisait un son (1 000 Hz, durée 100 ms) dans leur casque. Le délai entre l'appui sur le bouton et la tonalité était pseudo-randomisé avec l'un des trois délais (250, 450 ou 650 ms). Des intervalles similaires ont déjà été utilisés dans d'autres études évaluant la liaison au moyen d'une horloge Libet (Haggard et al., 2002). Les participants devaient estimer, dans des blocs séparés, le moment où ils ont appuyé sur le bouton (bloc opérant d'action) ou celui où ils ont entendu la tonalité (bloc opérant de conséquence), en se référant à la position de l'aiguille de l'horloge à ce moment-là. Les participants devaient éviter de répondre de manière stéréotypée à une position prédéfinie de l'aiguille sur l'horloge ou pendant la première rotation de l'aiguille. Dans la condition baseline, les participants ont soit appuyé sur le bouton qui n'a pas produit le son (baseline d'action), soit attendu le son sans appuyer sur le bouton (baseline de conséquence), dans des blocs séparés. La tonalité s'est produite de façon aléatoire entre 2 560 ms et 8 000 ms après le début de l'essai, ce qui correspond approximativement à la distribution de l'appui sur le bouton par les participants dans la condition opérante et le bloc Action de base. En somme, dans les conditions de base, un seul événement se produit, soit l'action, soit le résultat, et dans les conditions actives, l'action et le résultat se produisent tous les deux. La tâche consiste à repositionner l'aiguille de l'horloge, après qu'elle se soit arrêtée, à sa position lorsque l'événement d'intérêt, selon le bloc, s'est produit.

L'aiguille de l'horloge s'arrêtait pour tourner de manière aléatoire entre 1 500 et 2 500 ms et changeait de position de manière aléatoire sur l'une des 12 marques, suite à : la tonalité dans la condition opérante et dans le bloc de conséquence de base ; ou la pression sur le bouton dans le bloc d'action de base. Ensuite, les participants signalent la position de l'aiguille sur l'horloge à laquelle l'événement d'intérêt pour ce bloc s'était produit, en replaçant directement l'aiguille de l'horloge à la position souhaitée, à l'aide du pavé directionnel du contrôleur invisible.

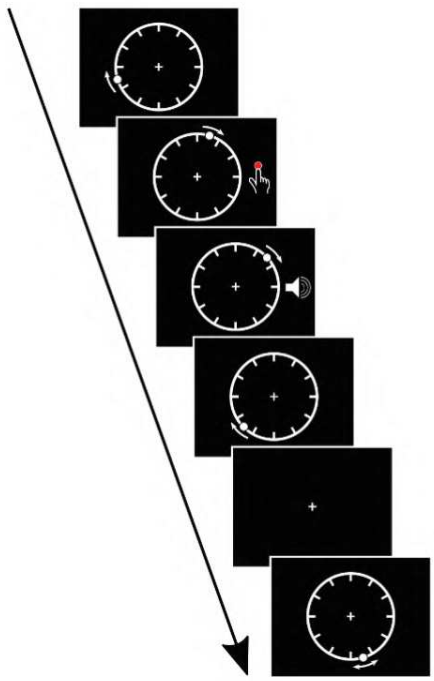

FIGURE 20 – Principe de l'horloge de Libet utilisée dans l'étude 2

L'ensemble des blocs était contrebalancé entre les participants. Les participants se sont familiarisés avec la tâche et la condition pendant les essais d'entraînement : 2 essais avant un bloc baseline et 3 essais avant un bloc opérant (un pour chaque délai : 250, 450 et 650 ms). L'horloge était affichée en face du participant et le contrôleur visible était positionné sur un rectangle bleu, affiché sur le bureau virtuel, entre l'horloge et le participant. Ainsi, l'horloge et le bouton étaient tous deux facilement observables pendant la tâche. Après les essais d'entraînement, la collecte formelle des données a commencé avec 15 essais pour chaque bloc de base et 45 essais pour chaque bloc opérant (15 pour chaque délai : 250, 450 et 650 ms). Soit un total de 10 essais d'entraînement et 120 essais expérimentaux.

Jugement d'agentivité :
L'agentivité a également été mesuré directement, par l'administration d'une question après chaque bloc opérant. A la fin d'un bloc opérant, le participant devait répondre à la question : *«Dans quelle mesure avez-vous ressenti qu'en appuyant sur le bouton de la manette vous avez provoqué les bips sonores ?»* en utilisant le pavé directionnel de la manette invisible, pour choisir entre 7 items de Likert (*1 : "Pas du tout" à 7 : "Totalement"*).

Échelle d'agentivité (F-SoAS) :
Après avoir fini la tâche de liaison intentionnelle en RV et retiré le casque, les participants ont rempli l'échelle du sens d'agentivité globale F-SoAS (Hurault, Broc, Crône, Tedesco, & Brunel, 2020).

2.1.3.2 Traitements et Analyses statistiques

Pour la tâche de liaison intentionnelle, la liaison totale correspond à l'addition de la liaison d'action et de la liaison de conséquence. La liaison d'action correspond à la soustraction de l'erreur perceptive moyenne du bloc baseline d'action de l'erreur perceptive moyenne du bloc opérant d'action. La liaison de conséquence correspond à la même soustraction, mais avec le bloc baseline de conséquence et le bloc opérant de conséquence. Chaque participant a contribué à une liaison d'action, une liaison de conséquence et une liaison totale. A cela s'ajoute, les écarts-types intra-participant des estimations temporelles (transformation en temps de la position perçue de l'aiguille lors d'un événement) fournissent une mesure de la variabilité des estimations. Chaque participant a contribué à quatre mesures de variabilité d'estimation, une pour chaque bloc : baseline action, opérant action, baseline conséquence et opérant conséquence.

L'erreur perceptive de chaque essai a été calculée comme la différence entre la position perçue et la position réelle de l'aiguille de l'horloge lors de l'événement d'intérêt, selon le bloc (Haggard et al., 2002). Ces différences d'angle ont été transformées en différences temporelles (différence d'angle x 2,560 ms/60). Si les différences par essai s'écartent de +/- 2,5 écarts-types par rapport à la moyenne du participant dans la condition respective, elles étaient écartées (en moyenne, 2,54% pour chaque participant, ET = 3,48%). Pour une procédure similaire, voir Haering et Kiesel (2014) et Ruess, Thomaschke, et Kiesel (2017). Une différence négative indique que le participant perçoit l'événement comme survenant plus tôt que son moment réel ; une différence positive indique un événement perçu comme survenant plus tard que son moment réel. Lorsque les estimations étaient ambiguës en raison de l'arithmétique circulaire de l'horloge (par ex., lorsqu'un rapport était ambigu entre un jugement retardé d'une position précédente de l'horloge ou une anticipation de la même position lors de la rotation suivante), l'intervalle le plus court était préféré.

Afin de faciliter la lecture des résultats, les différences ont été calculées de manière à ce que les deux mesures, c'est-à-dire la liaison de conséquence et la liaison d'action, aient des valeurs positives. Des valeurs positives pour la liaison d'action signifient un biais de l'action vers la conséquence, c'est-à-dire que l'action a été perçue plus tard si elle était suivie de la conséquence par rapport à si elle était perçue seule. Des valeurs positives pour la liaison de conséquence signifient un biais de la conséquence vers l'action, c'est-à-dire qu'elle est perçue plus tôt si elle a été déclenchée par une action que si elle apparaît seule.

Pour l'échelle du sens de l'agentivité globale (F-SoAS), nous avons calculé deux scores : l'agentivité globale positive (SoPA), en additionnant les items 1, 8, 9 et 13 ; et l'agentivité globale négative (SoNA) en additionnant les items 3, 7 et 11 (Hurault et al., 2020).

Les corrélations ont été faites avec le Rho de Spearman en raison de la non-normalité des jugements d'agentivité et des facteurs SoPA et SoNA. L'analyse des données a été réalisée à l'aide de JASP 0.14.1

2.1.3.3 Résultats

• Corrélations entre la taille d'effet de la liaison totale et les facteurs du F-SoAS

Tous les délais ont montré une liaison totale significative, 250 ms : t(31) = 4,09 ; p < .001 (M = 73,44 ; ES = 17,94 ; IC95% = [39,58 ; 107,31]) ; 450 ms : t(31) = 5,24 ; p < .001 (M = 77,52 ; ES = 14,78 ; IC95% = [43,66 ; 111,39]) ; 650 ms : t(31) = 4,53 ; p < .001 (M = 78,85 ; ES = 17,39 ; IC95% = [44,98 ; 112,71]). L'ANOVA à mesures répétées selon les 3 conditions de délai (250, 450 et 650 ms) a révélé que la liaison totale n'augmente pas pour des délais plus longs, F(2, 62) = 0,14 ; p = .87 ; ηp^2 = .005. Partant de cette absence de différence entre les délais, et afin d'augmenter la puissance statistique, nous avons choisi de considérer l'ensemble des données, indépendamment du délai, pour l'analyse de corrélation entre la force de la liaison totale et les facteurs du F-SoAS. Le résultat de la corrélation de la liaison totale montre une corrélation significativement négative avec le SoPA, rho = -.36 ; p = .04, et une absence de corrélation avec le SoNA, rho = .08, p = .67.

En résumé, il y a un effet de liaison intentionnelle sur l'ensemble des mesures, mais il ne dépend pas de la condition de délai d'apparition de la conséquence. De plus, la liaison intentionnelle est reliée, de façon négative, uniquement au facteur d'agentivité globale positive (SoPA).

• Corrélations entre la taille d'effet des liaisons (action et conséquence) et les facteurs du F-SoAS

Concernant la liaison d'action, les participants percevaient leurs actions, suivies d'une conséquence (bloc opérant d'action, M = -24,73 ms ; ES = 25,93 ms), comme étant arrivées plus tard que leurs actions ne produisant pas de conséquence (bloc baseline d'action, M = -84,69 ms ; ES = 21,11 ms). Cette différence (M = 58,30 ms ; ES = 12,58 ms) est significative : t(31) = 4,63, p < .001, d de Cohen = .82. Pour évaluer si la liaison d'action était significative pour chaque délai, nous avons encore effectué des t-tests séparés. Tous les délais ont montré une liaison d'action significative, 250 ms : t(31) = 4,12 ; p < .001 (M = 59,95 ; ES = 14,54 ; IC95% = [32,52 ; 87,39]) ; 450 ms : t(31) = 5,18 ; p < .001 (M = 58,94 ; ES = 11,37 ; IC95% = [31,50 ; 86,37]) ; 650 ms : t(31) = 3,84 ; p < .001 (M = 56,11 ; ES = 14,60 ; IC95% = [28,68 ; 83,55]). L'ANOVA à mesures répétées selon les 3 conditions de délai a révélé que la liaison d'action n'augmentent pas avec des délais plus longs, F(2, 62) = 0,10 ; p = .90 ; ηp^2 = .003.

Concernant la liaison de conséquence, les participants percevaient la tonalité, arrivant après leur action (bloc opérant de conséquence, M = 167,40 ms ; ES = 13,22 ms), comme étant arrivées plus tôt que la tonalité se produisant seule (bloc baseline de conséquence, M = 185,78 ms ; ES = 14,95 ms). Cette différence (M = 18,38 ms ; ES = 10,64 ms) est tendancielle, bien que non significative : t(31) = 1,73, p = .09, d de Cohen = .30. Pour évaluer si la liaison de conséquence était significative pour certains délais, nous avons encore effectué des t-tests séparés. Seul le délai de 650 ms a montré une liaison de conséquence significative, 250 ms : t(31) = 1,07 ; p = .29 (M = 13,49 ; ES = 12,62 ; IC95% = [-9,99 ; 36,97]) ; 450 ms : t(31) = 1,59 ; p = .12 (M = 18,58 ; ES = 11,65 ; IC95% = [-4,9 ; 42,07]) ; 650 ms : t(31) = 2,15 ; p = .04 (M = 22,73 ; ES = 10,58 ; IC95% = [-0,75 ; 46,21]) [1]). L'ANOVA à mesures répétées selon les délais a révélé que la liaison de conséquence n'augmente pas non plus avec des délais plus longs, F(2, 62) = 0,64 ; p = .53 ; ηp^2 = .02.

Partant de l'absence de différences entre les délais et afin d'augmenter la puissance statistique, nous avons choisi de considérer l'ensemble des données (indépendamment du délai) pour les futures analyses. De plus, la liaison totale n'étant corrélée qu'avec le SoPA, nous ne parlerons que des analyses avec celui-ci. L'ANCOVA à mesures répétées selon les moyennes des différentes liaisons (action et conséquence), avec le SoPA comme covariable, n'a pas révélé de différence significative entre ces types de liaison (F(1,30) = 0,007 ; p = .93 ; $\eta p^2 < .001$), ni d'interaction avec le SoPA (F(1,30) = 0,123 ; p = .73 ; ηp^2 = .004). Cependant, elle montre un effet principal tendanciel du SoPA sur l'ensemble des liaisons : F(1,30) = 3,094 ; p = .089). L'analyse de corrélations montre que le SoPA n'est pas corrélé significativement avec la taille de la liaison d'action (rho = -.17 ; p = .34), cependant il apparaît tendanciellement corrélé avec la taille de la liaison de conséquence (rho = -.27 ; p = .13) mais reste non significatif.

En résumé, seule la composante d'action de la liaison intentionnelle est significative, tandis que la composante de conséquence n'est que tendancielle. Également, le délai d'apparition de la conséquence n'a pas eu d'influence sur la force des ces liaisons. Enfin, l'agentivité globale positive semble influencer spécifiquement la taille de la liaison de conséquence de façon négative.

1. Par souci d'exhaustivité, nous avons également réalisé les analyses avec le SoNA. Aucune n'a montré de significativité.

• Corrélations entre la variabilité des estimations et les facteurs du F-SoAS

Concernant la liaison d'action, la variabilité des estimations pour le bloc baseline est de 97,65 ms (ES = 10,38) et pour le bloc opérant de 120,47 ms (ES = 10,20). Concernant la liaison de conséquence, la variabilité pour le bloc baseline est de 83,70 ms (ES = 5,91) et pour le bloc opérant de 98,66 m (ES = 5,46). Une ANOVA à mesure répétées sur la variabilité des estimations, entre le type de bloc (baseline ou opérant) et le type d'événement (action ou conséquence) a révélée une différence significative selon le type de bloc ($F(1,31) = 7,90$; $p = .009$) et selon le type d'événement ($F(1,31) = 4,95$; $p = .03$). L'interaction n'est cependant pas significative ($F(1,31) = 0,38$; $p = .54$). De plus, une ANOVA à mesures répétées selon les 3 conditions de délai a révélé que la variabilité n'augmente pas avec des délais plus longs, ni pour le bloc opérant d'action, $F(2, 62) = 0,14$; $p = .87$; $\eta p^2 = .004$, ni pour le bloc opérant de conséquence, $F(2, 62) = 0,59$; $p = .56$; $\eta p^2 = .02$.

Concernant les blocs baseline, l'ANCOVA à mesures répétées selon la variabilité des estimations, avec le SoPA comme covariable, n'a pas révélé de différence significative de variabilité entre les blocs baseline ($F(1,30) = 0,584$; $p = .45$; $\eta p^2 = .019$), ni d'interaction avec le SoPA ($F(1,30) = 0,992$; $p = .33$; $\eta p^2 = .032$). De plus, l'effet principal du SoPA n'est pas significatif : $F(1,30) = 0,578$; $p = .45$). Concernant les blocs opérant, l'ANCOVA à mesures répétées selon la variabilité des estimations, avec le SoPA comme covariable, n'a également pas révélé de différence significative entre les blocs opérant ($F(1,30) = 1,334$; $p = .26$; $\eta p^2 = .043$), ni d'interaction avec le SoPA ($F(1,30) = 0,41$; $p = .53$; $\eta p^2 = .013$). Cependant, elle montre un effet principal significatif du SoPA sur ces variabilités : $F(1,30) = 4,29$; $p = .047$). L'analyse de corrélations montre que le SoPA est tendanciellement corrélé avec la variabilité du bloc opérant d'action (rho = -.32 ; $p = .07$) et atteint le seuil de significativité pour la variabilité du bloc opérant de conséquence (rho = -.45 ; $p = .01$).

En résumé, la variabilité des estimations apparaît plus forte lors des blocs opérants, comparés aux blocs baselines. De plus, la variabilité est plus faible dans les blocs de conséquence que d'action et les délais d'apparition de la conséquence n'ont pas influencé la variabilité. De plus, l'agentivité globale positive (SoPA) influence la variabilité de la liaison intentionnelle. Les résultats indiquent que plus le niveau de SoPA est élevé et plus la variabilité est faible.

• Corrélations entre la liaison intentionnelle et le jugement d'agentivité

La corrélation entre la moyenne des jugements d'agentivité, des deux blocs opérants, et la taille de la liaison totale n'est pas significative (rho = .008 ; p = .97). Cependant, il y a une corrélation tendanciellement positive entre le jugement d'agentivité lors du bloc opérant d'action et la taille d'effet de la liaison d'action, rho = -.29 ; p = .11. Également, il y a une corrélation tendanciellement négative entre le jugement d'agentivité lors du bloc opérant de conséquence et la taille de la liaison de conséquence, rho = .34 ; p = .05. Les jugements d'agentivité, mesurés lors de chaque bloc opérant, ont également été comparés avec la variabilité des estimations de leurs blocs respectifs. Les résultats ne montrent pas de corrélation significative, ni pour le bloc opérant d'action, rho = -.17 ; p = .36, ni pour celui de conséquence, rho = .01 ; p = .97.

En résumé, le jugement d'agentivité semble lié à la liaison intentionnelle, mais de manière opposée selon le bloc dans lequel il est mesuré. Un fort jugement d'agentivité est plutôt associé à une faible liaison d'action, tandis qu'il est plutôt associé à une forte liaison de conséquence. De plus, les jugements d'agentivité ne sont pas associés à des différences de variabilités des estimations.

• Corrélations entre le jugement d'agentivité et les facteurs du F-SoAS

Une ANCOVA à mesures répétées entre les jugements d'agentivité, avec le SoPA en covariable, n'a pas révélée d'effet d'interaction entre le type bloc auxquels sont associés les jugements et le SoPA : F(1,30) = 0,04 ; p = .84 ; p2 = .00. De plus, elle n'a pas révélé d'effet principal du SoPA : F(1,30) = 0,05 ; p = .82. La même analyse, mais avec le SoNA en covariable, a révélé un effet d'interaction tendanciel entre le type bloc et le SoNA : F(1,30) = 2,63 ; p = .11 ; ηp^2 = .02., mais pas d'effet principal du SoNA : F(1,30) = 1,22 ; p = .28. Afin d'explorer ces effets tendanciels, nous avons regardé les corrélations entre les jugements d'agentivité et le SoNA. Pour le bloc opérant d'action, les jugements d'agentivité ne sont pas corrélés au SoNA : rho = -0,08 (p = .65), cependant pour le bloc opérant de conséquence, les jugements d'agentivité sont corrélés tendanciellement au SoNA : rho = -0,34 (p = .06).

En résumé, seule l'agentivité globale négative (SoNA) montre des influences sur les jugements d'agentivité, mais uniquement lors du bloc opérant conséquence. Enfin, un SoNA élevé est associé à des jugements d'agentivité plus faible lorsque la tâche était focalisée sur la conséquence.

2.1.3.4 Discussion

Pour cette étude, nous avons utilisé un paradigme de liaison intentionnelle, qui intègre également des jugements d'agentivité sur cette tâche, afin de réaliser des analyses corrélationnelles entre ces mesures et les scores à l'échelle d'agentivité globale F-SoAS.

Comme attendu, la mesure indirecte de l'agentivité, la liaison intentionnelle, est influencée par l'agentivité globale des participants (mesurée par le F-SoAS), notamment au travers de son facteur d'agentivité globale positive (SoPA). Seulement, la direction négative de cette influence implique qu'un fort niveau d'agentivité globale positive est associé à une faible liaison intentionnelle. Cela est contraire aux attentes que l'on aurait pu avoir, à savoir qu'une plus grande agentivité globale devrait être associée à une plus forte liaison intentionnelle. En effet, la force de cette liaison a été décrite comme reflétant le degré d'agentivité (Haggard, 2017).

Les résultats sur les composantes de la liaison intentionnelle (liaison d'action et liaison de conséquence) apportent des explications sur cette discordance. Ils montrent que la liaison intentionnelle dépend principalement du rapprochement temporel de l'action vers la conséquence (liaison d'action).

Ajoutons que nous ne retrouvons aucun effet du délai d'apparition de la conséquence sur la liaison intentionnelle, contrairement à la littérature (Wen, Yamashita, & Asama, 2015). Cela amène à considérer que l'aspect aléatoire d'apparition de la conséquence, entre les 3 délais possibles, a interféré avec la liaison de conséquence. Cette interférence serait le produit d'une imprédictibilité du moment d'apparition de la conséquence de l'action. En effet, lorsque l'on intègre les caractéristiques de nos interactions, les mécanismes sensorimoteurs et cognitifs se basent sur différents indices, prédictifs et postdictifs (Synofzik et al., 2013). La limite d'accès à ces indices prédictifs, quant à l'apparition d'une conséquence, expliquerait l'absence d'effet significatif sur la liaison de conséquence (Tanaka, Matsumoto, Hayashi, Takagi, & Kawabata, 2019). Tandis que la liaison d'action bénéficie d'indices prédictifs fiables (par ex., prédiction du moment d'initiation de l'action, schémas moteurs, prédiction des retours proprioceptifs de mon action, telle que le clic du bouton), la liaison de conséquence ne peut bénéficier quasiment que de indices postdictifs (par ex., contexte environnemental, croyances).

Pour revenir sur le lien négatif entre l'agentivité globale positive (SoPA) et la force de la liaison intentionnelle, les résultats montrent un effet négatif spécifique du SoPA sur la liaison de conséquence. Il semble que plus le niveau de SoPA est élevé et plus cette incapacité à prédire diminue la liaison de conséquence. Cette interprétation est d'ailleurs

cohérente avec la prise en compte des résultats sur la variabilité des estimations. En effet, ils montrent que plus le niveau de SoPA est élevé et plus la variabilité est faible, indépendamment du bloc opérant.

Cette plus grande constance dans les estimations, chez les personnes ayant un plus fort niveau d'agentivité globale positive, indique un effet de liaison intentionnelle plus stable et donc une moins grande sensibilité aux indices postdictifs, reflétant ici des conséquences imprédictibles.

Concernant l'agentivité globale négative (SoNA), les résultats n'indiquent aucun lien avec la liaison intentionnelle. Ils apportent néanmoins quelques pistes avec les résultats sur les jugements d'agentivité. Ces derniers sont corrélés, tendanciellement, avec le SoNA mais uniquement lorsqu'ils sont produits dans le bloc opérant de conséquence. Il semblerait que les participants ayant de plus fort niveau d'agentivité globale négative déclarent moins d'agentivité sur une conséquence imprédictible de leur action lorsqu'elle est rendue saillante. Le fait que ces liens entre SoNA et agentivité locale ne semblent présents que pour des jugements, et selon l'attention consciente du participant, pourraient indiquer que le SoNA influence le poids des indices d'agentivité cognitive externe, tels que les informations de l'environnement. Les participants avec un fort niveau de SoNA seraient plus sensibles aux influences extérieures, ce qui est cohérent avec l'approche du SoNA comme proche de l'impuissance apprise (Tapal et al., 2017).

Au regard de l'ensemble de ces résultats, nous proposons que l'échelle d'agentivité globale (F-SoAS) présente une validité externe avec d'autres mesures de l'agentivité. En effet, le facteur d'agentivité globale positive (SoPA) reflète ici une tendance à l'agentivité, associée aux traitements spécifiques de ses propres actions et de leurs conséquences, présents dans la liaison intentionnelle. Plus spécifiquement, nous proposons que la liaison intentionnelle, et potentiellement le sens d'agentivité, se construise préférentiellement sur des mécanismes prédictifs chez les individus ayant de forts niveaux de SoPA. De plus, le SoNA semble refléter ici une tendance à l'agentivité, associée aux traitements cognitifs postdictifs, présents dans les jugements d'agentivité. Plus spécifiquement, nous proposons que les jugements d'agentivité, et potentiellement le sentiment d'agentivité, se construisent préférentiellement sur des indices extérieurs et contextuels.

ÉTUDE 2

Résumé : Nous avons validé une échelle française du sens de l'agentivité, au niveau du trait individuel stable (étude 1). Cependant, le sens de l'agentivité possède différentes mesures, déjà validées, avec lesquelles il était important de comparer les mesures de l'échelle afin de pouvoir proposer une cohérence conceptuelle avec les mécanismes déjà étudiés dans l'agentivité (prédictif et postdictif). Cette étude 2 a utilisé le paradigme de liaison intentionnelle, mesurant la compression temporelle perçue entre la survenue de nos actions et de leurs conséquences, avec une mesure de jugement d'agentivité. L'analyse des différents liens entre ces mesures locales (indirecte et directe) et notre nouvelle mesure globale a fait ressortir l'influence du facteur d'agentivité globale positive (SoPA) sur les mécanismes prédictifs d'intégration des conséquences de nos actions. De plus, ils questionnent sur les liens entre le facteur d'agentivité globale négative (SoNA) et les mécanismes postdictifs, associés aux indices cognitifs externes, tel que le contexte, notamment à l'œuvre dans nos jugements d'attributions.

⟶ **Valorisation :** *Cette étude fait l'objet d'un article scientifique en cours de rédaction.*

Cependant, elle nécessite d'être complétée au travers d'une seconde expérience. Celle-ci devra reproduire le paradigme, mais en utilisant des conditions de délais fixes afin de renforcer notre proposition sur l'influence du SoPA sur les mécanismes d'agentivité et augmenter la puissance statistique avec une taille d'échantillon plus importante.

■

2.1.4 Synthèse de l'axe 1

L'objectif de ce premier axe était de développer une mesure d'agentivité utile dans l'étude de l'agentivité en situation d'apprentissage. Le niveau d'agentivité globale mis en avant dans les travaux de Tapal et al. (2017) nous a offert la possibilité de valider une mesure spécifique de l'agentivité, suffisamment indépendante d'une situation particulière, pour être utilisée avec l'ensemble des situations et méthodes pédagogiques. Nous avons ainsi validé une traduction de cette mesure, appelée F-SoAS, au travers de deux études. La première a utilisé des analyses factorielles pour confirmer la validité de notre traduction de l'échelle de mesure et de la pertinence de ses deux facteurs : SoPA et SoNA. La deuxième étude a utilisé des analyses corrélationnelles entre cette mesure et deux autres mesures classiques de l'agentivité afin d'établir des liens entre les mécanismes sensorimoteurs et cognitifs que ces mesures pourraient partager.

L'axe 1 a permis de valider une conception de l'agentivité au travers d'un trait individuel, le niveau d'agentivité globale. Celui-ci peut être mesuré par l'échelle F-SoAS et permet de distinguer deux aspects de ce trait individuel, le SoPA et le SoNA (étude 1). Pour développer la compréhension autour de l'échelle d'agentivité globale nouvellement adaptée, nous avons examiné la validité externe avec des mesures d'agentivité directe et indirecte existantes (étude 2). Les facteurs d'agentivité globale apparaissent reliés aux différentes mesures d'agentivité, déjà utilisées dans la littérature (Haggard, 2017). Selon nos résultats, il semble qu'un fort niveau de SoPA implique une tendance à se reposer principalement sur des mécanismes prédictifs lors de l'intégration des conséquences de ses actions et potentiellement lors de la construction de son agentivité locale. Cette tendance pourrait reposer sur une meilleure conscience de ses intentions d'actions, rendant leurs propriétés, notamment temporelles, plus accessibles au niveau sensorimoteur et influençant particulièrement les processus prédictifs. Ces résultats nous amènent à proposer également un lien entre les mécanismes d'agentivité, notamment postdictifs, et le SoNA. Il semblerait reposer sur l'utilisation de mécanismes postdictifs. Cela impliquerait une tendance à accorder plus d'importance aux indices cognitifs externes de l'agentivité, utilisant principalement les informations du monde extérieur, du contexte.

Enfin, cette mesure déclarative pourrait être facilement intégrée à des situations pédagogiques et offrir un outil supplémentaire de prise de décision quant à l'orientation de l'apprenant. En effet, comme nous l'avons vu avec l'étude 2, l'agentivité globale semble s'appuyer sur des habitudes sensorimotrices et une plus grande importance accordée aux indices internes (prédictions) d'un côté (SoPA) et de l'autre, des croyances cognitives accordant une plus grande importance aux indices externes (postdiction et contexte) (SoNA). Cela offre un moyen d'estimer la tendance individuelle à s'approprier des interac-

tions et faire sens de notre environnement en s'établissant comme un agent à part entière. Il devient important d'observer ces liens dans un cadre plus pertinent à l'apprentissage au travers de l'utilisation de l'échelle. Nous reviendrons également sur les perspectives et limites de l'échelle ainsi que les nécessités expérimentales de tester les hypothèses issues des propositions sur les mécanismes sous-jacents des facteurs d'agentivité globale lors de la discussion générale.

2.2 Axe 2 : Le sens de l'agentivité et l'apprentissage

2.2.1 Introduction et objectifs

Pour étudier l'influence du sens de l'agentivité dans l'apprentissage, nous nous sommes basés sur une méthode pédagogique, appelée "Hooks Shifts" (Abrahamson, Trninic, Gutiérrez, Huth, & Lee, 2011). L'objectif des études de cet axe 2 était donc double : évaluer l'influence du sens de l'agentivité globale de l'apprenant sur cet apprentissage et fournir des preuves de gain d'apprentissage pour cette méthode.

Cette dernière consiste à créer des interactions par le biais d'une activité sensorimotrice soigneusement orchestrée autour d'une tâche de résolution de problème, où les interactions possibles sont instrumentées, conçues et suivies pour faciliter l'abstraction, en utilisant un artefact (par ex., un outil, un objet). Ainsi, l'artefact est conçu pour agir à la fois comme un moyen d'accomplir l'activité, et comme un support pour l'abstraction. En effet, tandis que les apprenants développent et articulent une stratégie de manipulation réussie de l'artefact pour résoudre le problème (c.-à-d., soulever la planche), nous introduisons progressivement de nouveaux symboles, ou signes abstraits, sur l'artefact (c.-à-d., additionner la graduation puis les nombres). Cela permet de les intégrer dans la perception de la solution par les apprenants et d'établir une similitude entre cette activité sensorimotrice contextuelle et les connaissances mathématiques qui sous-tendent le problème (c.-à-d., la moyenne arithmétique). Tout en résolvant le problème par eux-mêmes, les apprenants sont également interrogés sur leurs observations et leurs prédictions afin de susciter une réflexion (Abrahamson et al., 2011). Ces questions servent d'incitations à l'auto-explication, engageant les apprenants dans un "dialogue avec soi-même" itératif tout en résolvant le problème. Ce processus vise à permettre aux apprenants de générer des connaissances sur leur propre traitement et devrait améliorer la génération de connexions causales, afin de comprendre et de construire des connaissances abstraites (pour un revue récente, voir Bisra, Liu, Nesbit, Salimi, & Winne, 2018).

Par conséquent, les apprenants sont engagés dans un processus dialectique entre deux situations, à savoir "Hook" et "Shift". D'une part, les "Hooks" sont des situations où un nouveau signe abstrait est introduit sur l'artefact. Les apprenants l'engagent parce qu'ils perçoivent son utilité contextuelle pour améliorer leur contrôle sur l'interaction afin de résoudre le problème, ou pour expliquer et évaluer leur stratégie. D'autre part, les "Shifts" sont des situations où, en engageant l'artefact, les apprenants assimilent de nouvelles propriétés de l'artefact, perçoivent des différences entre les situations de "Hook" précédentes et deviennent capables de reconfigurer leur stratégie. En d'autres termes, les apprenants doivent développer et articuler une stratégie réussie de manipulation de l'artefact pour

résoudre un problème, en créant des occasions d'expérimenter une divergence entre ce qui est censé se produire et ce qui se produit réellement. Cela les amène à se rendre compte des dimensions qui ont conduit à des hypothèses inappropriées. Puis, de réconcilier ce conflit par le biais de l'auto-réflexion afin de prioriser progressivement les dimensions qui conduisent à des hypothèses appropriées. Ainsi, en introduisant et en réfléchissant sur les signes abstraits associés à l'artefact, cela facilite la création de similitudes entre les signes et les expériences sensorimotrices, conduisant à une connaissance abstraite.

Suite à ce processus dialectique de "Hooks and Shifts", des études qualitatives ont été menées pour appréhender comment les apprenants s'approprient intuitivement, ou "Hook", l'artefact présenté pour résoudre le problème (Abrahamson et al., 2011 ; Petrick, 2012). Cependant, nous ne comprenons toujours pas comment les apprenants se réapproprient, ou "Shift", les artefacts présentés pour développer des connaissances abstraites. Nous avons soutenu que les situations de "Shift" sont associées à un sens pour les apprenants, conditionnant leurs croyances et leur perception, le sens de l'agentivité. En effet, l'agentivité est souvent induite dans l'approche constructiviste. Elle est définie, à l'origine par des activités sensorimotrices que l'on retrouve également dans l'approche constructiviste, créant un lien pertinent entre cette notion et ce cadre. Agentivité et apprentissage reposent sur l'action du corps et peuvent s'associer grâce à des mécanismes identiques ou du moins très proches (Spengler et al., 2009). Il est, pour autant, important de préciser que l'apprentissage ne concerne pas uniquement l'amélioration de la performance de l'individu, mais touche également à la construction de connaissances abstraites. À ce titre, l'agentivité se conçoit aussi de façon cognitive et métacognitive (ou globale). Cette précision a une importance particulière qui apporte une nuance au lien assumé entre apprentissage et agentivité, car, à ce jour, aucun lien n'est établi entre la construction d'une connaissance et le niveau d'agentivité global d'un individu. Nous postulons que les situations de "Shift", signalant la capacité d'abstraction des apprenants, dépendraient des deux aspects de l'agentivité globale. On pourrait s'attendre à ce que l'agentivité globale positive (SoPA) facilite les situations de "Shift", tandis que l'agentivité globale négative (SoNA) interfère avec elles.

C'est pourquoi le premier objectif de cet axe, et qui représente l'objectif principal, est de mesurer ce niveau d'agentivité globale au sein d'une méthode d'apprentissage constructiviste (voir figure 21).

À partir de la méthode "Hooks and Shifts", nous avons tout d'abord créé une situation qui permet de passer d'une activité uniquement sensorimotrice vers une connaissance abstraite par l'introduction graduelle de symboles ainsi que des phases de réflexion (Apprentissage actif - étude 1). Puis, nous avons étudié les possibilités d'apprendre indirectement par l'observation de cette méthode en vidéo (Apprentissage passif - étude 2). Nous avons cherché à créer un lien entre les connaissances des apprenants et des expériences sensorimotrices.

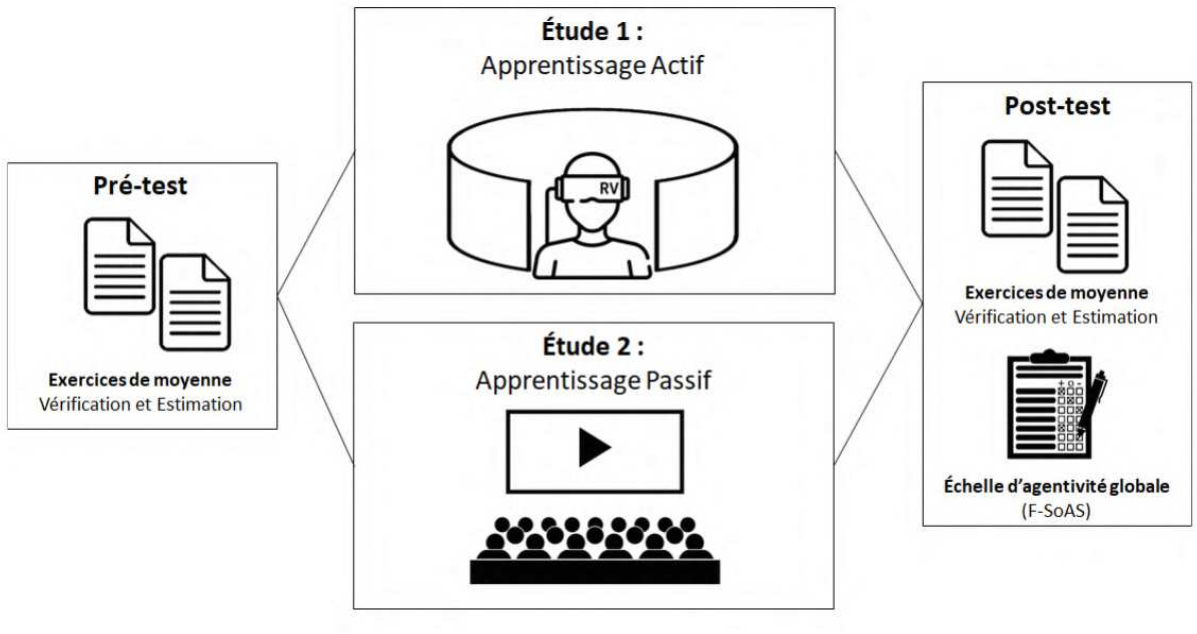

FIGURE 21 – Protocole de l'expérience de l'axe 2

Nous avons cherché à créer un lien entre les connaissances des apprenants et des expériences sensorimotrices. Pour cela, nous avons utilisé la métaphore analogique de la moyenne arithmétique comme un point autour duquel une distribution de données est équilibrée, c'est-à-dire le point d'équilibre de l'ensemble de données. En améliorant la connaissance abstraite autour de la moyenne arithmétique comme représentative d'un ensemble de données (MacCullough, 2007 ; Marnich, 2008), elle fournit des aspects sensorimoteurs pour la caractériser comme le "centre" d'une distribution (voir figure 22).

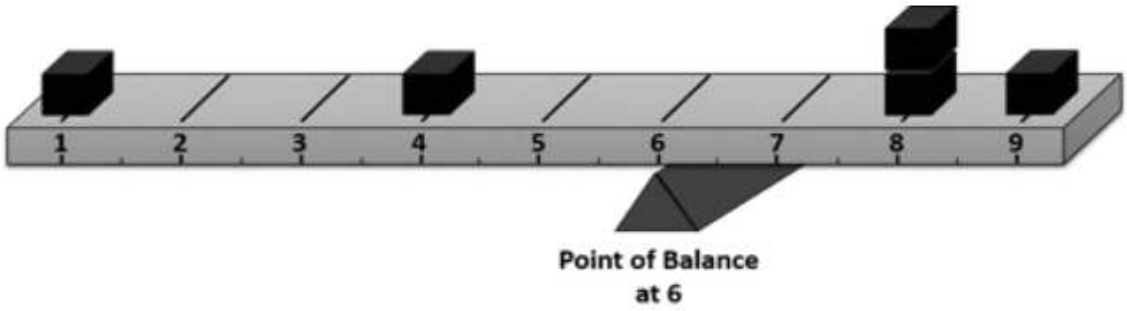

FIGURE 22 – Métaphore analogique de la moyenne arithmétique, vue comme le point autour duquel une distribution de données est équilibrée.

Au travers des deux études réalisées, **un deuxième objectif est rattaché au premier : celui de valider notre adaptation de la méthode "Hooks and Shifts" pour guider l'activité sensorimotrice et faciliter la construction d'une connaissance abstraite.** En effet, les connaissances abstraites, notamment mathématiques, renvoient difficilement à des expériences sensorimotrices (Lakoff & Núñez, 2000 ; Núñez, 2008). Comme évoqué ci-dessus, pour illustrer une connaissance abstraite à acquérir, il nous est apparu pertinent de proposer une connaissance mathématique abstraite jugée généralement difficile à apprendre par les étudiants et souvent mal compris de ces derniers : celui de la moyenne arithmétique (Mathews & Clark, 2003). Ce choix est justifié par le fait que les étudiants des universités sont souvent invités à suivre un cours d'introduction aux statistiques. C'est particulièrement le cas en psychologie car, sans une solide formation statistique, les données numériques des sciences sociales et humaines peuvent facilement être mal interprétées et conduire à des perceptions ou des décisions mal informées (Gal, 2002 ; Utts, 2003). En effet, savoir comment calculer la moyenne arithmétique n'implique pas sa compréhension (Garfield et al., 2008). Nous faisons ces observations de façon systématiques dans notre université (Université de Montpellier 3, France). Les étudiants de première année de psychologie ayant des difficultés à comprendre ou à expliquer la moyenne arithmétique, cela se traduit par un taux d'abandon, d'échec et de retrait de 50%. Ainsi, la méthode mise en place est l'utilisation de la métaphore analogique de la moyenne comme point d'équilibre afin d'appliquer la méthode "Hooks and Shifts".

2.2.2 Étude 3 : Agentivité et apprentissage actif

Cette étude se concentre sur l'apport d'une activité fondée sur la méthode "Hooks and Shifts" (Abrahamson et al., 2011), adaptée à un dispositif de réalité virtuelle (RV), pour l'apprentissage d'une connaissance mathématique (celle de la moyenne arithmétique). De manière plus précise, les participants ont réalisé une activité consistant à soulever différentes planches sur lesquelles étaient positionnés des cubes. Cet artefact représente un ensemble de données sur lequel trouver le point d'équilibre revient à trouver la moyenne arithmétique de l'ensemble de données. En d'autres termes, la planche représente l'échelle des données tandis que le cube symbolise une donnée dont la position indique la valeur. Les participants devaient effectuer des essais pour déterminer la position de la planche qui leur permettrait de maintenir l'équilibre lorsqu'ils la soulèveraient. Cette tâche consistait à produire une estimation du point d'équilibre, et donc à produire une estimation de la moyenne. En outre, des signes abstraits ont été ajoutés à l'artefact au fur et à mesure qu'ils avançaient dans des ensembles de données plus complexes et ils ont été encouragés à expliquer leurs stratégies et leurs hypothèses concernant l'activité et la valeur des signes ajoutés.

Pour cette étude, nous avons utilisé un protocole pré-test/post-test autour de cette activité et avons mesuré le gain d'apprentissage pour deux types d'exercices sur la moyenne arithmétique (c.-à-d., des problèmes de vérification et d'estimation). Le fait d'avoir différents types d'exercices nous a permis de vérifier la spécificité de cet apprentissage, car ils engageaient différentes stratégies de résolution (Uittenhove & Lemaire, 2015). D'une part, les problèmes de vérification fournissent directement une solution possible à partir de laquelle il faut répondre en indiquant si elle est correcte. D'autre part, les problèmes d'estimation demandent de fournir une estimation personnelle de la solution. Par conséquent, nous nous attendions à un meilleur gain d'apprentissage pour les problèmes d'estimation, puisque l'activité proposée aux participants consiste également à produire une estimation directe et que les problèmes de vérification peuvent ne pas refléter les processus d'estimation (pour une revue de l'estimation numérique, Siegler & Booth, 2005). Devant estimer le point d'équilibre pendant l'activité, nous avions aussi prédit que les participants s'amélioreraient pendant l'activité, en réduisant leurs estimations, et que cette amélioration permettrait de prédire le gain d'apprentissage.

Après s'être assuré de l'efficacité de la méthode, nous avons réalisé l'objectif principal de cette étude qui est de mesurer l'influence du sens de l'agentivité sur l'apprentissage par cette même méthode. Pour cela, nous utilisons l'échelle d'agentivité globale développée lors de l'axe 1. En effet, le sens de l'agentivité a été associé à une amélioration de l'apprentissage. Plus précisément, le récent modèle d'apprentissage en RV, CAMIL, pro-

pose ainsi que l'immersion et l'interaction vont respectivement générer un sentiment de présence et un sentiment d'agentivité, facilitant l'apprentissage. Néanmoins, il est pris en compte uniquement au niveau de l'interaction sensorimotrice, les aspects cognitifs, voire métacognitifs, de l'agentivité ne sont pas abordés. Or, nous pensons que cela contribuerait à la compréhension de l'influence de l'agentivité sur les mécanismes d'apprentissage et à guider l'utilisation des méthodes constructivistes. C'est pourquoi nous avons évalué si la dialectique et la transition entre les situations de "Hooks" et de "Shifts" sont associées au sens de l'agentivité des apprenants. De ce fait, nous avons mesuré l'agentivité globale grâce à l'échelle F-SoAS et analysé si le gain d'apprentissage était prédit par ses facteurs. Nous avons prédit des effets significatifs, mais opposés, pour les deux facteurs, c'est-à-dire que plus les participants ont obtenu un score élevé en SoPA, plus le gain d'apprentissage est important et plus les participants ont obtenu un score élevé en SoNA, moins le gain d'apprentissage est important.

Le dispositif choisi pour réaliser mettre en œuvre cette activité d'apprentissage autour de la moyenne arithmétique, est la réalité virtuelle (RV). En effet, elle offre des opportunités uniques en termes d'immersion et d'interaction et rend possible une approche constructiviste efficace en termes de gains d'apprentissage (Fromm et al., 2021). La RV offre la possibilité de représenter des notions abstraites de manière tangible tout en générant l'engagement et la motivation des utilisateurs dans le processus d'apprentissage (Araiza-Alba, Keane, & Kaufman, 2020). Sans oublier les nouveaux contextes, fournis par la RV, qui facilitent la réflexion des utilisateurs sur leurs comportements (S. Smith & Ericson, 2009). Reprenant les directives de conception actuelles dans la RV, de récentes approches théoriques et pratiques commencent à proposer des indications sur la façon dont elles peuvent affecter les processus cognitifs d'apprentissage (Radianti et al., 2020, voir également Johnson-Glenberg, 2019), à l'instar du modèle CAMIL mettant l'accent sur l'agentivité permise par la RV. Ces perspectives uniques de la RV seraient essentielles à considérer pour le choix de la méthode d'apprentissage, afin de soutenir l'apprentissage.

Nous avons porté une attention particulière à offrir aux apprenants uniquement des interactions pertinentes pour la notion de moyenne (par ex., pas de possibilité de saisir la planche à deux mains, de la déplacer sur d'autres meubles, pas d'extérieurs, pas de musique...). En effet, il est important de ne pas induire de surcharge cognitive chez les apprenants en les immergeant dans un environnement virtuel trop riche (par ex., interactions inutiles, beaucoup de retours visuels...) qui pourrait entraver l'apprentissage (Makransky, Borre-Gude, & Mayer, 2019 ; Meyer et al., 2019). De plus, l'environnement virtuel fourni devrait faciliter la réflexion et la compréhension de la moyenne, au travers d'interactions permettant de relier efficacement les connaissances et l'expérience. Il est également important de noter ici que, comme c'est le plus souvent le cas en RV, nous avons

utilisé des artefacts virtuels et non des objets directement saisissables pour l'interaction. Notons que, d'un point de vue phénoménologique, nous ne considérons pas ici les artefacts virtuels et physiques comme ontologiquement distincts, car ils sont tout aussi apparents en tant qu'objets à travailler dans l'espace perceptuel de l'apprenant.

2.2.2.1 Méthode

- **Participants**

Vingt-quatre participants (19 femmes) de l'Université Montpellier III (Montpellier, France) ont donné leur consentement écrit et ont été récompensés par des crédits pour leur licence en psychologie. Ils étaient âgés en moyenne de 20,6 ans (ET = 2,4). Tous étaient étudiants en première année de licence et aucun d'entre eux n'avait encore reçu de cours de statistiques sur la moyenne, comme le prévoit leur licence de psychologie, ni redoublé leurs années universitaires. Tous avaient une vision normale ou corrigée à la normale, aucun problème moteur, aucun antécédent d'épilepsie et aucune ou très peu d'expérience de la réalité virtuelle. Le premier participant a été exclu en raison d'une erreur dans la collecte des données.

- **Matériel**

Exercices de la moyenne arithmétique :

Le déroulement de l'expérience, la collecte des réponses aux exercices et les questionnaires ont été réalisés par le logiciel Opensesame (Mathôt, Schreij, & Theeuwes, 2012). Ils ont été réalisés sur un ordinateur portable avec un écran de 17 pouces posé sur un bureau et assis sur une chaise. Les exercices étaient affichés sur l'écran du PC et construits avec différents ensembles de nombres, principalement à un chiffre, avec parfois de petits nombres à deux chiffres. Ce choix a été fait pour favoriser l'approximation et éviter le recours à une calculatrice, conformément au matériel général sur l'estimation numérique (par ex., Klein, Nuerk, Wood, Knops, & Willmes, 2009 ; Stanescu-Cosson et al., 2000).

Questionnaires :

Deux questionnaires ont été utilisés, le premier sur l'expérience de l'utilisateur dans l'environnement virtuel et le second sur l'agentivité globale (F-SoAS). Le questionnaire sur l'expérience de l'utilisateur est issu du travail de Hurault, Tedesco, Chambert-Loir & Brunel (2021, en soumission), basé sur la littérature sur la RV et plus particulièrement sur le riche travail de recherche de Mel Slater et de ses collègues (Event Lab - Université de Barcelone). La série complète de questions et l'échelle de notation sont présentées dans le tableau ?. Les deux facteurs d'agentivité globale (SoPA et SoNA), ont été mesurés à l'aide de l'échelle F-SoAS, développée dans l'axe 1 (Hurault et al., 2020).

Tableau 3

Distribution (moyennes et écarts types) des scores des questionnaires.

	M	ET
F-SoAS		
SoPA - Sens de l'agentivité positive (SoPA)	19,62	3,93
SoNA - Sens de l'agentivité négative (SoNA)	6,75	1,92
Expérience Utilisateur en RV		
Q1 - L'équipement de réalité virtuelle était-il confortable ? (−3: Pas du tout, +3: Tout à fait)	1,71	1,16
Q2 - L'équipement de réalité virtuelle était-il facile à utiliser ? (−3: Pas du tout, +3: Tout à fait)	2,00	1,10
Q3 - Avez-vous eu l'impression que vos mouvements dans l'environnement virtuel étaient causés par vos propres mouvements ? (−3: Pas du tout, +3: Tout à fait)	2,42	0,65
Q4 - Avez-vous trouvé que la pièce virtuelle, comparée à la pièce réelle, était : (−3: Plus petite; +3: Plus grande)	-0,04	1,76
Q5 - Veuillez sélectionner le dessin qui, selon vous, exprime le mieux ce que vous avez ressenti dans l'environnement virtuel. (Échelle de valence SAM, 1: Heureux, 5: Malheureux)	2,12	0,80
Q6 - Est-ce que le fait d'avoir utilisé la réalité virtuelle vous a fait ressentir le mal des transports (c-à-d maux de tête, nausées, vision floue, vertiges, etc.) ? (−3: Pas du tout, +3: Tout à fait)	-1,42	1,93

Activité "Hooks and Shifts" :

La pièce virtuelle ne comportait ni meubles, ni fenêtres, ni portes, et ses surfaces étaient similaires à celles de la pièce physique. Plus précisément, le sol avait une texture rouge, les murs une texture blanche et le plafond une texture grise de type carrelage de bureau (voir figure 2). Le seul objet virtuel représenté dans la pièce virtuelle était une planche, reposant sur deux piliers servant de support à la planche et positionnés contre un mur en son centre. Les piliers étaient des parallélépipèdes rectangles virtuels non interactifs, distants de 85 cm, avec une texture de contreplaqué et des dimensions de 17 cm de long, 45 cm de large et 100 cm de haut. La planche était un parallélépipède rectangle virtuel interactif avec une texture de couleur transparente et des dimensions de 100 cm de long, 15 cm de large et 2 cm de haut. En outre, des cubes virtuels, de texture noir métallique et de dimensions de 5 cm de long, 11 cm de large et 8 cm de haut, pouvaient être fixés sur la planche à des endroits spécifiques pour représenter une série de chiffres. Chaque cube pesait le même poids, soit 20 fois plus que la planche. Cette grande disproportion

permettait à la planche d'être négligeable par rapport aux cubes, conduisant le point d'équilibre de la planche à dépendre uniquement de la position des cubes. De plus, la couleur de la planche virtuelle était utilisée comme un indice visuel de son horizontalité, elle était verte lorsque la rotation était maintenue autour de 0° (±5°), sinon elle était rouge (voir figure 23).

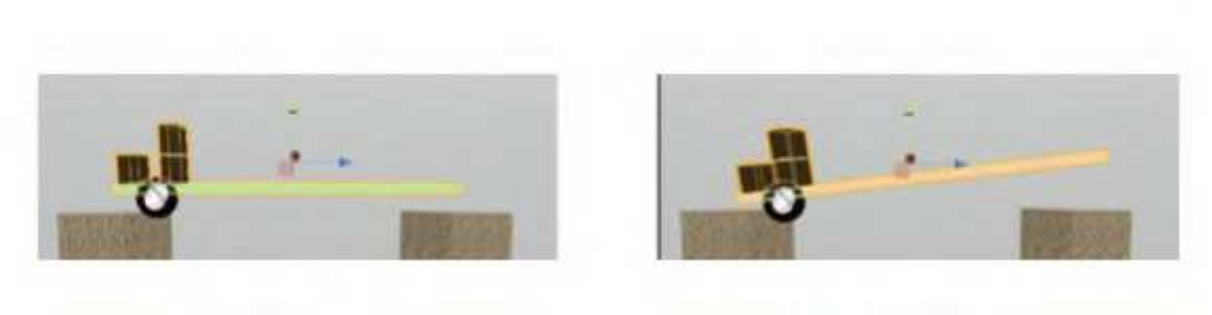

FIGURE 23 – (Gauche) Affichage de la planche en vert lorsqu'elle est maintenue à l'horizontale. (Droite) Affichage de la planche en rouge lorsqu'elle n'est pas maintenue à l'horizontale.

Les participants restaient debout dans la pièce, portaient le HMD et utilisaient un contrôleur HTC Vive (avec leur main dominante) pour interagir. Le contrôleur était représenté par une poignée, une traverse et un petit rectangle (4 cm de long, 18 cm de large et 2 cm de haut) à l'extrémité. L'utilisation de cette petite partie du rectangle était le seul moyen de déplacer la planche et donc de la soulever.

- **Procédure**

La réalisation de l'expérience était individuelle et divisée en trois phases : un pré-test, une activité "Hooks and Shifts" et un post-test. Le pré-test et le post-test, réalisés en étant assis devant un bureau et à l'aide d'un ordinateur portable, duraient environ 15 minutes chacun. L'activité "Hooks and Shifts", réalisée en étant debout avec le HMD, a duré environ 30 minutes. L'expérience a duré environ soixante-cinq minutes, dont cinq minutes de débriefing à la fin.

Phases de pré-test et de post-test

Les participants ont commencé par lire les instructions et ont effectué deux exemples de chaque série d'exercices pour vérifier leur compréhension des instructions et des mécanismes de réponse. Dans le pré-test et le post-test, nous avons mesuré la performance des participants sur deux séries d'exercices relatifs à la moyenne arithmétique : l'une utilisant la vérification d'une moyenne suggérée et l'autre sur l'estimation de la moyenne (voir figure 24). L'ordre des séries était contrebalancé entre les participants.

Ainsi, les participants ont effectué deux séries d'exercices, qui comprenaient toutes deux huit propositions à difficulté progressive. La difficulté des exercices augmentait avec l'ajout d'un chiffre après deux exercices (c.-à-d., 3 puis 3, 4, 4, 5, 5, 6 et 6 chiffres). Il était explicitement demandé aux participants de répondre rapidement et de ne pas calculer, mais de se fier à une estimation approximative. Aucun retour sur l'exactitude des réponses n'a été donné aux participants. Ils disposaient d'un maximum de 30 secondes pour compléter les problèmes de vérification et de 40 secondes pour compléter les problèmes d'estimation (en tenant compte du temps d'écriture), après quoi on passait automatiquement à l'exercice suivant.

Une pré-étude sur ces exercices a été menée pour valider ces choix avec un bon taux de réussite, sans effet plafond ou plancher.

Les deux séries d'exercices diffèrent par le processus qu'elles impliquent. Concernant les problèmes de vérification, les propositions consistaient en une série de nombres dont la moyenne arithmétique était proposée en dessous. Les participants étaient invités à indiquer leur réponse en cliquant sur le bouton "Vrai" ou "Faux". A l'insu des participants, la moitié des moyennes proposées étaient correctes (c.-à-d., 4 propositions sur 8). Alors que pour les problèmes d'estimation, les propositions consistaient uniquement en la série de nombres et les participants devaient proposer un intervalle d'entiers, avec un maximum de un entre les bornes (par ex., pour cette série de nombres "8, 6, 4", la réponse correcte pourrait être " 5-6 " ou " 6-7 ").

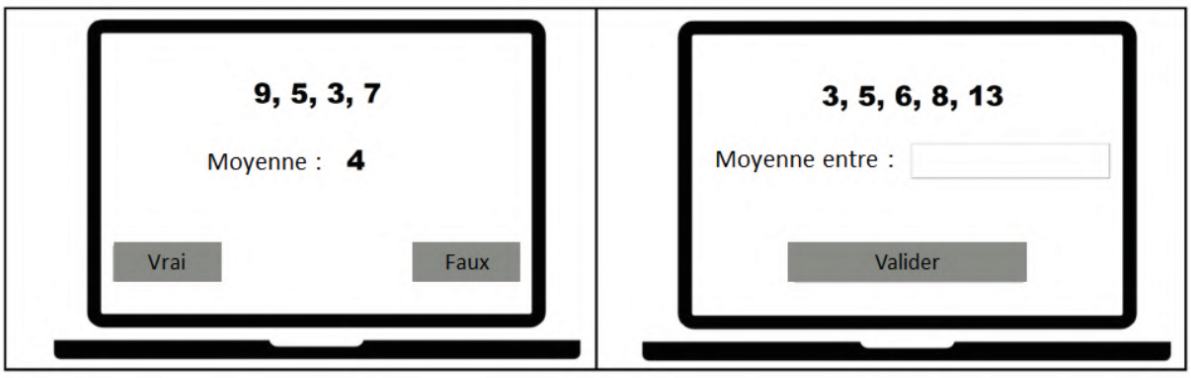

FIGURE 24 – (Exemple des exercices de moyenne. (Gauche : exercice de vérification ; Droite : exercice d'estimation)

Activité "Hooks and Shifts" L'activité consistait à trouver le point d'équilibre de différentes planches en les soulevant pendant environ 5 secondes tout en les maintenant à l'horizontale (c.-à-d., dans une couleur verte). Elle était divisée en 3 niveaux, permettant l'ajout de nouveaux symboles sur l'artefact (voir figure 25). Cela permettait à l'expérimentateur d'ajouter progressivement des symboles mathématiques sur l'objet et de guider les participants pendant la résolution de problèmes, et donc dans le processus d'abstraction.

Au cours du premier niveau, les participants devaient soulever la planche sans aucun symbole (niveau 0 : aucun symbole). Au cours du deuxième niveau, le participant voit apparaître la planche avec un premier niveau de symbole ajouté, à savoir une règle graduée (Niveau 1 : Règle graduée). Cette dernière permet au participant de se rendre compte de l'emplacement des cubes sur la planche, ce qui lui permet d'interpréter ses manipulations en insérant des notions liées aux quantités et à la distance. Enfin, le dernier niveau consistait à ajouter des chiffres (de 1 à 9) sur la règle graduée (Niveau 2 : Règle graduée avec chiffres).

Chaque niveau était composé de trois planches et pour chaque planche, le niveau de complexité augmente en modifiant le nombre de cubes et l'espace entre eux. Ainsi, en augmentant le nombre de cubes et la distance entre eux sur chaque planche, la difficulté de trouver le point d'équilibre augmentait. Tout au long de l'activité, les participants ont répondu à un entretien semi-structuré avec l'expérimentateur sur leurs pensées et leurs observations pendant l'activité.

Adapté des auteurs originaux de la méthode (Abrahamson et al., 2011), avant chaque tentative, les participants étaient invités à fournir leurs estimations et après chaque tentative, à revoir leur performance. En outre, les participants ont été invités à réfléchir à l'intérêt et au potentiel du symbole ajouté pour chaque niveau. Cela a permis aux participants de discuter de leurs idées et de leur raisonnement tout en limitant l'influence de l'expérimentateur dans ce processus. Une fois toutes les planches terminées et les participants ayant retiré le HMD, ils ont rempli le questionnaire sur l'expérience en réalité virtuelle. La procédure se termine par l'administration de l'échelle sur le sens de l'agentivité globale (F-SoAS).

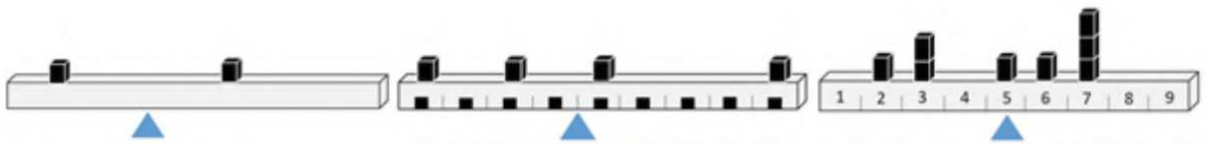

FIGURE 25 – (Gauche) Niveau 0 : Aucun symbole. (Au milieu) Niveau 1 : Règle graduée. (A droite) Niveau 2 : Règle graduée avec des chiffres.

- **Analyses des données**

Le progiciel Jasp 0.14.1 a été utilisé pour toutes les analyses statistiques, une valeur $p < .05$ étant considérée comme statistiquement significative.

"Hooks and Shifts" : Estimation du point d'équilibre

Les progrès des participants dans l'estimation du point d'équilibre pendant l'activité "Hooks and Shifts" ont été mesurés par les différences entre le point d'équilibre et la position du contrôleur HTC Vive lorsque les participants ont essayé de soulever la planche pour la première fois. Nous avons calculé la moyenne de ces différences pour tous les niveaux d'abstraction (c'est-à-dire niveau 0 : aucun symbole ; niveau 1 : règle graduée ; et niveau 2 : règle graduée avec chiffres). Les comparaisons statistiques ont été effectuées à l'aide d'une ANOVA à mesures répétées avec les niveaux comme facteur intra-sujet. Elle a été suivie des tests post-hoc de Bonferroni-Holm pour les comparaisons multiples. Les moyennes et les écarts types pour chaque niveau sont présentés dans le tableau 4.

"Hooks and Shifts" : Expérience utilisateur en RV

Pour vérifier l'expérience des apprenants dans la RV, nous avons utilisé les résultats descriptifs du questionnaire sur l'expérience de l'utilisateur de la RV. Les moyennes et les écarts types pour chaque question sont présentés dans le tableau 1.

Gain d'apprentissage : Différences entre le pré-test et le post-test pour les exercices de la moyenne

Pour analyser le gain d'apprentissage pour les exercices de la moyenne, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées avec le temps comme facteur intra-groupe à deux niveaux (pré-test, post-test) et le type d'exercice comme facteur intra-groupe à deux niveaux (problèmes de vérification et d'estimation). Les effets simples ont été testés par des tests t bilatéraux appariés pour les scores de chaque exercice dans le pré-test et le post-test.

Gain d'apprentissage : Explication par les progrès "Hooks and Shifts" et le sens de l'agentivité globale.

Pour évaluer si les caractéristiques mesurées de l'apprenant étaient des prédicteurs du gain d'apprentissage, nous avons réalisé une régression linéaire multiple avec la méthode inverse, en utilisant les deux facteurs du sens d'agentivité globale (SoNA et SoPA), mesurés

par le F-SoAS, et la progression de l'estimation dans l'activité "Hooks and Shifts" comme modèle. La progression de l'estimation pendant l'activité (progrès) “Hooks and Shifts” a été établie en utilisant des coefficients de régression linéaire pour chaque participant (comme la progression correspond à la différence d'estimation avec le point d'équilibre correct, nous utilisons la valeur absolue pour faciliter l'interprétation de l'analyse). Le test de normalité de Shapiro-Wilk a été utilisé avant de réaliser les analyses. La multicolinéarité a été inspectée à partir de la valeur de la tolérance et du facteur d'inflation de la variance (VIF).

Les résultats de la régression ont été décrits à l'aide d'estimations bêta standardisées. L'ajustement et la précision des modèles ont été évalués à l'aide des valeurs R^2 ajustées.

2.2.2.2 Résultats

"Hooks and Shifts" : Estimation du point d'équilibre

Tableau 4

Distribution (moyennes et ET) de la différence entre l'estimation et le point d'équilibre pour chaque niveau d'abstraction.

Différence entre estimation et point d'équilibre	M	ET
Niveau 0 : Aucun symbole	0,91	0,35
Niveau 1 : Règle graduée	0,58	0,33
Niveau 2 : Règle graduée avec chiffres	0,41	0,19

L'ANOVA à mesures répétées et à sens unique a révélé des différences significatives entre les trois niveaux de l'activité "Hooks and Shifts" [F (2.46) = 21.61, p < .001, ηp^2 = .48]. Les tests post-hoc ont révélé des différences significatives entre chaque niveau, respectivement : Niveau 0 (Aucun symbole) vs Niveau 1 (Règle graduée) [t (24) = 4,26, p < .001] ; Niveau 1 vs Niveau 2 (Règle graduée avec chiffres) [t (24) = 2,20, p = .033] ; et Niveau 0 vs Niveau 2 [t (24) = 6,46, p < .001]. Cela signifie que les participants ont réduit de manière significative leurs erreurs d'estimation ou leurs écarts par rapport au point d'équilibre, entre les niveaux de chaque abstraction. Par conséquent, les participants ont appris de leur interaction avec la planche et se sont améliorés au fur et à mesure que des symboles étaient introduits dans l'artefact. En d'autres termes, les participants ont pu apprendre de l'activité et améliorer leurs estimations du point d'équilibre de la planche.

"Hooks and Shifts" : Expérience utilisateur en RV

Les scores des participants au questionnaire sur l'expérience de la RV (voir tableau 3) ont révélé, sans surprise, qu'ils trouvaient le matériel de RV confortable (Q1) et facile à utiliser (Q2). Leurs scores moyens étant d'environ 2, dans notre échelle de -3 (Pas du tout) à 3 (Tout à fait), cela indique une acceptation modérée à forte de l'équipement, ce qui, compte tenu du poids du HMD (500 g) et de la nouveauté de la RV pour la plupart des participants, est élevé et conforme à d'autres études. Toujours en ce qui concerne l'expérience de l'utilisateur, les participants se sont également sentis très agent de leurs mouvements dans la RV (Q3), avec un score moyen de 2,4, et ils n'ont pas trouvé de différence de dimension entre la pièce réelle et sa réplication virtuelle (Q4), le score moyen étant de 0. Enfin, ils indiquent des émotions positives en RV (Q5) et un mal des transports faible ou nul (Q6). Ainsi, il semble raisonnable de conclure que les participants ont eu une expérience globalement positive avec l'activité "Hooks and Shifts" en réalité virtuelle.

Gain d'apprentissage : Différences entre le pré-test et le post-test pour les exercices

Les statistiques descriptives des performances des apprenants sur le type d'exercices (problèmes de vérification et d'estimation) avant (pré-test) et après (post-test) la réalisation de l'activité “Hooks and Shifts” sont présentées dans le tableau 5.

Une ANOVA à mesures répétées a été réalisée avec le temps comme facteur intra-groupe à deux niveaux (pré-test, post-test) et le type d'exercice comme facteur intra-groupe à deux niveaux (vérification et estimation). Elle a révélé un effet significatif du temps [F (1.23) = 14.99, p < .001, ηp^2 = .39] et du type d'exercice [F (1.23) = 9.51, p = .005, ηp^2 = .29].

De plus, les résultats ont montré une interaction significative entre le temps et le type d'exercice [F (1.23) = 6.30, p = .02, ηp^2 = .21]. L'analyse de cette interaction significative avec une analyse des effets principaux simples, par le biais de tests t appariés des scores du pré-test et du post-test de chaque type d'exercice, a révélé un effet significatif pour les exercices d'estimation [t (23) = -4.63 ; p < .001, d = .94] mais pas pour les exercices de vérification [t (23) = -0.26, p = .80, d = .05].

Dans l'ensemble, si l'on considère le gain d'apprentissage, les participants ont amélioré de manière significative leurs taux de réponses correctes pour les exercices de moyenne arithmétique en utilisant l'estimation après avoir terminé l'activité "Hooks and Shifts" dans la RV, passant de moins de 50% à presque 65%. Ce gain d'apprentissage n'a pas été observé pour les problèmes de vérification, les participants restant à environ 70% après l'activité "Hooks and Shifts" dans la RV. Par conséquent, le gain d'apprentissage de l'activité "Hooks and Shifts" n'a été significatif que pour les problèmes d'estimation.

Tableau 5

Distribution (moyennes et ET) des performances pour les types d'exercices dans les phases de pré-test et de post-test

	Problèmes de Vérification		Problèmes d'Estimation	
	M	ET	M	ET
Pré-test	69,8	17,3	47,9	24,1
Post-test	70,8	15,9	64,1	21,6

Gain d'apprentissage : Explication par les progrès "Hooks and Shifts" et le sens de l'agentivité globale

L'hypothèse de normalité a été respectée et aucune multicolinéarité n'était présente. La régression linéaire multiple à rebours (backward) n'a révélé aucun effet du SoPA, du SoNA ni de la progression de l'estimation dans l'activité "Hooks and Shifts". Enfin, la corrélation partielle du modèle le plus proche de la signification (modèle 3 du tableau 6) a montré une corrélation positive moyenne entre le gain d'apprentissage dans les problèmes d'estimation et la progression de l'estimation dans l'activité "Hooks and Shifts". Cependant, cette corrélation n'est pas significative [r = .30, p = .15] (voir tableau 6).

Cette corrélation partielle est particulièrement intéressante car elle montre une tendance des participants à améliorer leurs performances dans les problèmes d'estimation en fonction de leur progression dans l'activité "Hooks and Shifts".

Tableau 6

Régression linéaire inverse sur le gain d'apprentissage, en utilisant SoNA, SoPA et la progression de l'estimation comme modèle prédictif

Modèles		Standardized	t	p	F	p	R^2 ajusté	Corrélations partielles
1	(Intercept)	—	0.86	0.40	F (3.20) = 1.07	0.38	0.01	—
	Progrès des estimations	0.30	1.41	0.17				0.30
	SoPA	—0.20	— 0.94	0.36				—0.20
	SoNA	0.10	0.49	0.63				0.11
2	(Intercept)	—	1.38	0.18	F (2.21) = 1.54	0.24	0.04	—
	Progrès des estimations	0.28	1.38	0.18				0.29
	SoPA	—0.19	— 0.94	0.36				—0.20
3	(Intercept)	—	1.59	0.12	F (1.22) = 2.22	0.15	0.05	—
	Progrès des estimations	0.30	1.49	0.15				0.30
4	(Intercept)	—	4.63	<.001	—	—	—	—

2.2.2.3 Discussion

Pour cette étude, nous avons conçu une activité de résolution de problèmes utilisant la méthode "Hooks and Shifts". Dans cette méthode, les apprenants construisent activement leurs connaissances sur les principes sous-jacents au problème (c.-à-d., les relations entre la position des cubes et le point d'équilibre) tout en créant des similitudes entre cette situation et les exercices de moyenne arithmétique par abstraction. Le but de cette méthode était de faciliter l'apprentissage d'une connaissance abstraite (moyenne arithmétique). Cet apprentissage s'opère à travers une dialectique entre les situations "Hooks", où les apprenants articulent d'abord une stratégie pour résoudre le problème en utilisant un artefact, et les situations "Shifts", où de nouvelles stratégies et compréhensions émergent par la mise en œuvre de signes abstraits et la réflexion.

Nous avons d'abord évalué la validité de notre activité "Hooks and Shifts" sur l'apprentissage de la moyenne arithmétique. Pour ce faire, nous avons analysé le gain d'apprentissage des participants sur les exercices de moyenne, leur progression dans les estimations lors de l'activité "Hooks and Shifts" et l'effet prédictif de cette progression sur le gain d'apprentissage. Les résultats ont en grande partie confirmé nos prédictions, tout d'abord en montrant une amélioration significative sur les exercices de moyenne arithmétique après avoir réalisé l'activité "Hooks and Shifts", en particulier ceux utilisant des stratégies de résolution similaires, les problèmes d'estimation. En effet, la nature de l'activité était d'estimer la moyenne, en trouvant le point d'équilibre, ce qui pourrait avoir plus d'effet sur l'estimation que sur les problèmes de vérification. Deuxièmement, les résultats ont montré que les participants progressent pendant l'activité, en réduisant leurs estimations du point d'équilibre. Cependant, contrairement à la prédiction, aucun effet direct de cette progression sur le gain d'apprentissage n'a été trouvé. Bien qu'elle ne soit pas significative, la progression de l'estimation pendant l'activité a montré une corrélation positive avec le gain d'apprentissage. Les résultats ont également montré une forte acceptation de la RV pour cette activité, comme l'indiquent les réponses au questionnaire sur l'expérience de l'utilisateur de la RV. Globalement, l'activité "Hooks and Shifts", développée en RV, semble fonctionnelle pour induire un gain d'apprentissage. Le fait que cette activité semble induire un changement de performance dans un autre contexte d'exercice sur la moyenne, montre la transférabilité des connaissances et peut-être une meilleure compréhension de la connaissance mathématique abstraite, la moyenne arithmétique.

Ensuite, nous avons analysé si l'apprentissage, au travers de la dialectique de situations "Hooks" et "Shifts", était associé à l'agentivité globale des apprenants. Pour ce faire, nous avons mesuré les deux facteurs du sens de l'agentivité globale (SoPA et SoNA) et réalisé une régression multiple sur le gain d'apprentissage en les utilisant dans le modèle

prédictif. Nous avons prédit des effets significatifs, mais opposés, pour les deux facteurs, c'est-à-dire que plus les participants ont obtenu un score élevé en SoPA, plus le gain d'apprentissage est important et plus les participants ont obtenu un score élevé en SoNA, moins le gain d'apprentissage est important. Nos résultats n'ont pas confirmé ces prédictions, puisqu'aucun lien entre le gain d'apprentissage et les facteurs SoPA et SoNA n'a été trouvé. Étant donné que la méthode "Hooks and Shifts" est basée sur une activité sensorimotrice de résolution de problème, une possibilité pour ces résultats non concluants est que le sentiment local d'agentivité, lié au niveau sensorimoteur de l'agentivité (Synofzik et al., 2008), pourrait entraver, ou empêcher, une influence directe de l'agentivité globale pendant l'activité sensorimotrice. En effet, les participants contrôlent leur sensorimotricité pendant la résolution de problèmes, tout au long de l'exploration active et du feedback sensoriel direct. Ainsi, ils bénéficient d'une interaction spécifique, permise par la RV et la méthode orientée vers l'action, conduisant à l'expérience d'un fort sentiment d'agentivité, comme le propose le modèle CAMIL pour l'apprentissage avec la RV (Makransky & Petersen, 2021). Sur cette base, les participants ont dû porter un jugement local correspondant à l'agentivité pendant la réflexion et l'entretien avec l'expérimentateur, et le sentiment d'être un agent a donc pu soutenir l'abstraction. En outre, les différences interindividuelles semblent limitées par notre taille d'échantillon.

En somme, nos résultats indiquent que la méthode "Hooks and Shifts" favorise l'apprentissage de connaissances abstraites par le biais d'une exploration active, induisant un sens élevé de l'agentivité dans ce contexte local, qui aurait pu limiter l'effet de l'agentivité globale.

ÉTUDE 3

Résumé : Afin d'étudier l'influence du sens de l'agentivité sur l'apprentissage, nous avons utilisé une méthode d'apprentissage constructiviste, "Hook and Shift". Cette méthode a servi à développer une activité pédagogique afin d'aider les étudiants, en psychologie, à construire une connaissance abstraite mathématique, la moyenne arithmétique. L'activité a été réalisée grâce à la réalité virtuelle, les apprenants (24 étudiants de L1 Psychologie) devant utiliser leurs actions afin d'estimer le point d'équilibre de différentes planches virtuelles, utilisées comme métaphore analogique de la moyenne. Le gain d'apprentissage lié à l'activité a été confirmé en utilisant un paradigme pré-test/post-test, impliquant des tâches de vérification et d'estimation de moyenne. Cependant, les résultats n'ont pas montré d'effet direct de l'agentivité globale sur cet apprentissage. Il est possible que l'agentivité ait pu tout de même avoir une influence, potentiellement au travers de l'agentivité locale (sensorimotrice ou cognitive).

⟶ **Valorisation :** Article original accepté dans le journal "L'Année Psychologique / Topics in Cognitive Psychology" - *"I know what you mean" : Investigating the Sense of Agency in Learning an abstract Mathematical Knowledge using a Constructivist Method in Virtual Reality* - Auteurs : J.-C. Hurault, A. Tedesco et L. Brunel, 2021)

2.2.3 Étude 4 : Agentivité et apprentissage passif

Pour explorer l'hypothèse de la précédente étude, nous avons conçu une nouvelle étude, dans laquelle nous avons adapté cette procédure afin que les participants ne puissent pas éprouver d'agentivité locale sur l'activité. Les participants sont des observateurs et ne peuvent pas bénéficier d'une interaction directe ou d'une réflexion guidée par l'expérimentateur, se reposant sur l'apprentissage par observation (Bandura, 2008 ; Burke, Tobler, Baddeley, & Schultz, 2010). Les participants sont exposés à la même procédure que l'étude 3, les différences étant qu'ils ont regardé une vidéo de l'activité "Hooks and Shifts" au lieu de la réaliser directement. Comme notre hypothèse portait sur le lien entre l'agentivité globale et les situations de "Shift", nous avons utilisé trois vidéos, en fonction des profils d'apprenants présentés aux participants.

Premièrement, le profil de l'apprenant pouvait être aléatoire, puisqu'aucune progression de l'estimation n'était présentée et que le retour d'information sur la résolution du problème était uniquement incorrect.

Deuxièmement, le profil de l'apprenant pouvait être réaliste, montrant une progression normale de l'estimation avec des retours d'informations progressivement meilleurs, conformément à l'étude 3.

Troisièmement, le profil de l'apprenant pouvait être expert, ne montrant aucune progression de l'estimation et des retours d'informations corrects uniquement. Cette manipulation expérimentale sert à fournir des situations de "Shifts" uniquement dans le profil réaliste et à s'assurer que l'utilisation d'un retour d'information correct uniquement ne serait pas suffisante pour améliorer l'apprentissage par observation.

Notre prédiction était que les participants auraient un gain d'apprentissage en observant l'activité "Hooks and Shifts", en fonction des facteurs d'agentivité globale (SoPA et SoNA) mais seulement lorsqu'ils ont la possibilité d'observer des situations de "Shift" (condition de profil d'apprenant réaliste).

2.2.3.1 Méthode

- **Participants**

Deux cent soixante-dix-sept participants (238 femmes) de l'Université Montpellier III (Montpellier, France) ont donné leur consentement écrit pour participer à l'étude. Ils étaient âgés de 19,9 ans en moyenne (ET = 2,97 ans). Tous étaient étudiants en première année de licence et aucun d'entre eux n'avait encore reçu de cours de statistiques sur la moyenne, comme le prévoit leur licence de psychologie. Les participants ont été répartis en trois groupes indépendants, en fonction des profils d'apprenants (aléatoire, réaliste ou expert) montrés dans la vidéo de l'activité de RV. Le groupe "profil aléatoire" était composé de 91 participants (80 femmes), le groupe "profil réaliste" de 94 participants (83 femmes) et le groupe "profil expert" de 92 participants (75 femmes). L'âge des participants était similaire pour chaque groupe. Douze participants (4,15%) ont été exclus des données en raison de réponses incomplètes à au moins un des exercices ou au F-SoAS.

- **Matériel**

Exercices de la moyenne arithmétique et Livret de participation

Le déroulement de l'expérience a été réalisé à l'aide d'un vidéoprojecteur pour afficher la vidéo et les séries d'exercices, mais également de livrets papier pour recueillir les réponses aux exercices et aux questionnaires. La taille de l'écran projeté était contrôlée pour mesurer 2mx1,5m et la taille des caractères était ajustée si les participants au fond de la classe avaient des difficultés à lire. Le livret était composé de trois pages : la première page contenait le formulaire de consentement ; la deuxième page contenait des tableaux pour écrire leurs réponses aux exercices et un questionnaire sur la vidéo ; la troisième page contenait l'échelle du sens de l'agentivité globale (F-SoAS).

Profils des apprenants et vérification de la manipulation des vidéos

Toutes les vidéos ont été créées en enregistrant l'écran de l'ordinateur, à partir du logiciel OBS et la personne réalisant l'activité était l'expérimentateur. Le profil d'apprenant de l'utilisateur virtuel réalisant l'activité "Hooks and Shifts", montré dans la vidéo, pouvait être aléatoire. Cela indique que la personne dans la vidéo n'a pas montré de progrès dans l'estimation de l'activité, avec une estimation pseudo-aléatoire et de grands écarts par rapport au point d'équilibre. Aucun retour correct sur la résolution du problème n'était présent dans la vidéo. Elle pouvait être réaliste, montrant la progression normale de l'estimation du point d'équilibre, correspondant à la progression réaliste des participants dans l'étude 3. Un retour d'information correct était progressivement fourni au fur et à mesure que l'estimation devenait plus précise tout au long des essais. Enfin, il pouvait être expert, ne montrant aucune progression de l'estimation, car seul un retour correct était présenté, soit des estimations correctes de l'estimation de l'équilibre de la planche.

En outre, nous vérifions si les manipulations expérimentales avec la vidéo ont été efficaces en demandant aux participants de noter différentes affirmations liées à l'activité observée (voir tableau 7), à l'aide d'une échelle de Likert à 6 items (de 1 : "Totalement en désaccord" à 6 : "Totalement d'accord"). En effet, comme nous créons ces vidéos dans le but de produire différents types d'apprentissage, nous nous attendions à trouver des preuves de ces différences.

Plus précisément, en utilisant une première affirmation (*Q1 - La personne dans la vidéo a réussi l'activité*), nous nous attendions à des taux plus élevés dans la condition réaliste par rapport à la condition aléatoire, mais à des taux plus faibles par rapport à la condition expert.

En utilisant un deuxième énoncé (*Q2 - Dans l'ensemble, l'activité m'a semblé facile*), nous nous attendions à des taux similaires, car les planches utilisées dans l'activité étaient identiques pour chaque condition.

En utilisant une troisième affirmation (*Q3 - Je me suis mis à la place de la personne pendant l'activité*), nous nous attendions à des taux plus élevés dans la condition réaliste, par rapport aux autres, car la prise de perspective serait facilitée lors de l'observation d'une performance "réaliste", d'après la première expérience.

En utilisant un quatrième énoncé (*Q4 - J'aurais facilement réussi l'activité*), nous nous attendions à des différences similaires entre les conditions, comme pour le troisième énoncé, car une prise de recul plus important et l'accès à une progression dans l'activité facilitent l'estimation par les participants de leur propre capacité à réussir dans la condition réaliste.

Enfin, en utilisant un cinquième énoncé (*Q5 - J'ai eu l'impression de mieux anticiper en regardant la personne faire l'activité*), nous nous attendions également à un schéma similaire à celui du troisième énoncé, étant donné qu'une plus grande prise de recul et l'accès à une progression dans l'activité faciliteraient les estimations des participants de la position correcte. Les résultats descriptifs des énoncés, en fonction des conditions, sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7

Distribution (moyennes et ET) des cinq questions utilisées pour vérifier les manipulations vidéo.

	Profil Aléatoire		Profil Réaliste		Profil Expert	
	M	ET	M	ET	M	ET
Q1 - La personne dans la vidéo a réussi l'activité.	3,63	1,75	4,29	0,98	5,26	0,77
Q2 - Dans l'ensemble, l'activité m'a semblé facile.	3,96	1,27	3,64	1,07	3,60	1,18
Q3 - Je me suis mis à la place de la personne pendant l'activité.	3,45	1,62	4,28	1,43	3,91	1,69
Q4 - J'aurais facilement réussi l'activité.	3,78	1,10	3,52	1,03	3,25	1,06
Q5 - J'ai eu l'impression de mieux anticiper en regardant la personne faire l'activité.	3,70	1,48	4,23	1,27	3,88	1,30

- **Procédure**

Cette étude a été réalisée en classe entière avec 12 cours universitaires comprenant chacun 20 à 30 étudiants (cours de travaux dirigés). Tous les cours étaient des introductions aux statistiques dans le cursus de psychologie. Les enseignants ont été contactés par courriel expliquant l'étude et demandant leur accord. Pour ceux ayant accepté, l'étude a été proposée et réalisée auprès de leurs étudiants au début d'un cours, sur une base strictement volontaire. Les étudiants qui ont accepté de participer à l'étude ont reçu un livret de participation à remplir, en suivant les instructions de l'expérimentateur. Ceux refusant de participer, toujours en accord avec l'enseignant, peuvent soit rester silencieux dans la classe, soit sortir, comme lors d'une pause normale en classe. L'enseignant est resté dans la classe pendant toute la durée de l'étude, mais n'est plus intervenu après avoir présenté l'expérimentateur. Les participants avaient pour consigne de ne pas interagir entre eux pendant l'étude, ni utiliser quoi que ce soit d'autre que le livret et un stylo. Après l'étude, les étudiants ont repris le cours avec l'enseignant.

La réalisation de l'expérience a été divisée en trois phases : un pré-test, une observation de l'activité "Hooks and Shifts" et un post-test. Les phases de pré-test et de post-test ont duré environ 15 minutes chacune et l'activité d'observation environ 15 minutes. Par conséquent, en ajoutant 5 minutes de débriefing, l'expérience a duré environ cinquante minutes.

Phases du pré-test et du post-test
Les phases de pré-test et de post-test étaient presque identiques à celles de l'étude 3. Les participants, après avoir vu des exemples, ont effectué les deux types d'exercices sur la moyenne arithmétique (problèmes de vérification et d'estimation). Les seules différences résidaient dans la manière de voir les exercices et de donner leurs réponses. Les participants voyaient des séries de nombres sur l'écran projeté, au lieu d'un écran d'ordinateur, et écrivaient leurs réponses sur le livret papier. L'ordre des séries était contrebalancé entre les salles de classe et les participants disposaient toujours d'un maximum de 30 secondes pour effectuer un exercice de vérification et de 40 secondes pour effectuer un exercice d'estimation, après quoi on passait automatiquement à l'exercice suivant.

Activité d'observation "Hooks and Shifts"
Après avoir effectué les exercices de moyenne arithmétique dans la phase de pré-test, les participants ont effectué un apprentissage par observation en regardant une vidéo présentant un avatar (personne virtuelle) effectuant l'activité "Hooks and Shifts". Les participants ont suivi le même pré-briefing décrivant les objectifs de l'activité. On leur a demandé d'observer une personne, représentée par un avatar, dans une vidéo réalisant l'activité. Ils étaient assis devant la vidéo et avaient pour instruction de rester silencieux et d'observer attentivement. A l'insu des participants, en fonction de leur classe, ils ont été répartis dans l'une des trois conditions basées sur les profils d'apprenants de la vidéo. Après la vidéo, les participants ont évalué les énoncés relatifs à la vidéo afin de vérifier la manipulation de l'expérience. Enfin, après avoir effectué la phase de post-test, ils ont répondu à l'échelle d'agentivité globale F-SoAS.

- **Analyses Statistiques**

Le progiciel Jasp 0.14.1 a été utilisé pour toutes les analyses statistiques, une valeur $p < .05$ étant considérée comme statistiquement significative.

Vidéo "Hooks and Shifts" : Vérification de la manipulation vidéo
La validité des manipulations expérimentales pour les profils d'apprenants (c.-à-d., aléatoire, réaliste et expert) dans la vidéo a été évaluée en utilisant les réponses des participants aux cinq énoncés. Les moyennes et l'erreur standard ont été calculées pour chaque question, en fonction des profils d'apprenants (voir tableau 5). Des tests d'analyse de la variance (ANOVA) ont comparé les scores inter-profils et des tests de Tukey ont été utilisés pour l'analyse post-hoc.

Gain d'apprentissage : Différences entre les exercices du pré-test et du post-test
Pour analyser le gain d'apprentissage pour les exercices moyens, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées avec le temps comme facteur intra-groupe à deux niveaux (pré-test, post-test), le type d'exercice comme facteur intra-groupe à deux niveaux (problèmes de vérification et d'estimation) et les profils d'apprenants comme facteur inter-groupe à trois niveaux (c.-à-d., aléatoire, réaliste et expert). Nous avons terminé en analysant les effets principaux simples, par des tests t appariés des scores de chaque exercice dans le pré-test et le post-test. Voir le tableau 8 pour les scores détaillés.

Gain d'apprentissage : Explication par les profils des apprenants et le sens de l'agentivité globale
Pour évaluer si les facteurs d'agentivité globale des apprenants (SoPA et SoNA) étaient associées au gain d'apprentissage, nous avons réalisé deux analyses de covariance (ANCOVA) entre les groupes de profils d'apprenants, une pour chaque type d'exercice (problèmes de vérification et d'estimation). Nous avons terminé en utilisant une régression linéaire pour les profils des apprenants de chaque vidéo pour prédire le gain d'apprentissage. Le test de normalité de Shapiro-Wilk a été utilisé avant de procéder aux analyses. La multicolinéarité a été inspectée à partir de la valeur de la tolérance et du facteur d'inflation de la variance (VIF). Les résultats de la régression ont été décrits à l'aide d'estimations bêta standardisées. L'ajustement et la précision des modèles ont été évalués à l'aide des valeurs R2 ajustées.

2.2.3.2 Résultats

- **Vidéo "Hooks and Shifts" : Vérification de la manipulation vidéo**

Pour le premier énoncé de la vidéo (*Q1 - La personne dans la vidéo a réussi l'activité.*), l'ANOVA a révélé un effet significatif des profils d'apprenants de la vidéo [F (2.274) = 40.56, p < .001, $\eta p^2 = .23$]. Les tests post-hoc ont révélé des différences significatives entre chaque profil, respectivement : Aléatoire-Réaliste (t (182) = 3,64, p < .001), Aléatoire-Expert (t (181) = 8,95, p < .001) et Réaliste-Expert (t (184) = 5,37, p < .001). Cela signifie que les participants ont correctement perçu les différents niveaux de progression dans les vidéos.

Pour le deuxième énoncé de la vidéo (*Q2 - Dans l'ensemble, l'activité m'a semblé facile.*), l'ANOVA n'a révélé aucun effet significatif des profils d'apprenants de la vidéo [F (2.274) = 2.56, p = .079, $\eta p^2 = .02$]. Les tests post-hoc n'ont révélé aucune différence significative entre chaque profil, respectivement : Aléatoire-Réaliste (t (182) = 1,84, p = .16), Aléatoire-Expert (t (181) = -2,06, p = .10) et Réaliste-Expert (t (184) = -0,23, p = .97). Cela signifie que les participants n'ont pas perçu différemment la difficulté de l'activité en fonction du profil d'apprenant observé.

Pour le troisième énoncé de la vidéo (*Q3 - Je me suis mis à la place de la personne pendant l'activité.*), l'ANOVA a révélé un effet significatif des profils d'apprenants de la vidéo [F (2.274) = 6.32, p = .002, ηp^2 = .04]. Les tests post-hoc n'ont révélé qu'une différence significative entre les profils aléatoires et réalistes (t (182) = 3,55, p = .001), mais aucune différence significative entre les profils aléatoires et experts (t (181) = 1,98, p = .12) ni entre les profils réalistes et experts (t (184) = -1,57, p = 0,26). Cela signifie que les profils des apprenants ont influencé la prise de perspective des participants.

Pour la quatrième affirmation de la vidéo (*Q4 - J'aurais facilement réussi l'activité.*), l'ANOVA a révélé un effet significatif des profils d'apprenants de la vidéo [F (2.274) = 5.64, p = .004, ηp^2 = .04]. Les tests post-hoc n'ont révélé qu'une différence significative entre les profils aléatoire et expert (t (181) = -3,36, p = .003), mais aucune différence significative entre les profils aléatoire et réaliste (t (182) = -1,65, p = .23) ni entre les profils réaliste et expert (t (184) = -1,73, p = .19). Cela signifie que les profils d'apprenants ont influencé la perception des participants quant à leur capacité à réussir la même activité.

Enfin, pour le cinquième énoncé de la vidéo (*Q5 - J'ai eu l'impression de mieux anticiper en regardant la personne faire l'activité.*), l'ANOVA a révélé un effet significatif des profils d'apprenants de la vidéo [F (2.274) = 3.70, p = .026, ηp^2 = .026]. Les tests post-hoc n'ont révélé qu'une différence significative entre les profils aléatoires et réalistes (t (182) = 2,67, p = .02), mais aucune différence significative entre les profils aléatoires et experts (t (181) = 0,89, p = .65) ni entre les profils réalistes et experts (t (184) = -1,78, p = .18). Cela signifie que les profils des apprenants ont influencé la capacité des participants à prédire la position correcte, en d'autres termes, à apprendre à partir de la vidéo.

Dans l'ensemble, nos manipulations expérimentales des vidéos ont été validées. En effet, conformément aux attentes de l'expérimentateur, les participants n'ont pas trouvé de différences sur la difficulté de l'activité mais ont perçu des différences dans la réussite de l'activité "Hooks and Shifts" observée. Ils ont noté un succès plus élevé de la personne observée dans la vidéo du profil "Expert", un succès moyen dans le profil "Réaliste" et un succès plus faible dans le profil "Aléatoire". En outre, le profil réaliste était associé à une plus grande prise de recul de la part des participants et à une meilleure perception de l'apprentissage à partir de l'observation vidéo. Cependant, ils n'ont pas jugé leur propre capacité de réussite meilleure dans la condition réaliste. Comme des différences ont été constatées entre les conditions aléatoire et expert, avec une capacité perçue plus élevée dans la condition aléatoire, cela pourrait indiquer que les participants ont utilisé la performance observée pour estimer leurs propres capacités dans la même activité.

• **Gain d'apprentissage : Différences entre le pré-test et le post-test dans les exercices**

Sur le plan descriptif, les résultats des scores ont montré de légères différences entre le pré-test et le post-test pour les deux types d'exercices et pour chaque profil d'apprenant. Pour vérifier si ces résultats étaient significatifs, une ANOVA à mesures répétées a été réalisée avec le temps comme facteur intra-groupes (pré-test et post-test), le type d'exercice comme autre facteur intra-groupes (vérification et estimation) et les profils d'apprenants comme facteur inter-groupes (profils aléatoire, réaliste et expert). Les résultats ont révélé des effets significatifs pour le temps [F (1.274) = 6.60, p = .011, ηp^2 = .02] et pour le type d'exercice [F (1.274) = 298.96, p < .001, ηp^2 = .52]. Par contre, il n'y a pas d'effet d'interaction entre le temps et le type d'exercice [F (1.274) = 1.18, p = .28, ηp^2< .01], ni entre le temps et le profil des apprenants [F (2.274) = 0.12, p = .89, ηp^2< . 01], ni entre le type d'exercice et les profils des apprenants [F (2.274) = 1.36, p = .26, ηp^2= .01], ni entre le temps, le type d'exercice et les profils des apprenants [F (2.274) = 0.16, p = .86, ηp^2< .01]. De plus, l'analyse des effets principaux, par le biais de tests t appariés des scores au pré-test et au post-test de chaque type d'exercice et pour chaque profil d'apprenant, n'a révélé aucun effet significatif (voir tableau 8).

Tableau 8

Distribution (moyennes et ET) des performances pour les types d'exercices dans les phases pré-test et post-test, selon les profils des apprenants.

		Problèmes de Vérification		**Problèmes d'Estimation**	
		M	ET	M	ET
Profil Aléatoire	**Pré-test**	68,0	18,4	50,4	23,7
	Post-test	70,8	19,6	52,2	21,9
Profil Réaliste	**Pré-test**	68,5	20,7	47,9	24,5
	Post-test	73,0	20,0	50,9	23,4
Profil Expert	**Pré-test**	65,9	20,8	50,5	22,1
	Post-test	70,6	21,4	51,8	22,6

Globalement, les participants ont de meilleurs résultats sur les exercices post-test et pour les problèmes de vérification, mais cela ne dépend pas des profils d'apprenants de la vidéo.

• Gain d'apprentissage : Explication par les profils des apprenants et le sens de l'agentivité globale

Notre hypothèse principale était que le gain d'apprentissage, suite à l'observation de l'activité "Hooks and Shifts", dépend des facteurs d'agentivité globale (SoPA ou SoNA) mais seulement pour la condition de profil réaliste de l'apprenant. Ainsi, pour le tester, nous avons d'abord réalisé deux analyses de covariance (ANCOVA) pour examiner les effets du SoPA et du SoNA entre les groupes de profils d'apprenants, une ANCOVA pour chaque type d'exercice (vérification et d'estimation).

Concernant les problèmes de vérification, l'ANCOVA n'a révélé aucune différence entre les profils d'apprenants [F (2.268) = 0.17, p = .84, ηp^2 = .001], aucune différence entre les scores d'agentivité globale négative (SoNA) [F (1.268) = 0.50, p = .48, ηp^2 = .002] ni d'agentivité globale positive (SoPA) [F (1.268) = 0.05, p = 0.81, $\eta p^2 < .001$], tous deux facteurs de F-SoAS. De plus, aucune interaction n'est significative, ni entre les profils des apprenants et le SoNA [F (2.268) = 1.03, p = .36, ηp^2 = .008], ni entre les profils des apprenants et le SoPA [F (2.268) = 1.02, p = .36, ηp^2 = .007]. Par conséquent, le profil de l'apprenant observé et les facteurs d'agentivité globale n'ont pas eu d'effets sur la performance des participants aux problèmes de vérification de la moyenne arithmétique.

Concernant les problèmes d'estimation, l'ANCOVA n'a également révélé aucune différence entre les profils d'apprenants [F (2.268) = 2.90, p = 0.06, ηp^2 = .02], aucune différence entre les scores de SoNA [F (1.268) = 0.34, p = 0.56, ηp^2 = .001] ni de SoPA [F (1.268) = 0.27, p = 0.60, $\eta p^2 < .001$]. Cependant, l'interaction entre les profils des apprenants et le SoPA était significative [F (2.268) = 3.85, p = 0.02, ηp^2 = .03], mais pas entre les profils des apprenants et le SoNA [F (2.268) = 0.30, p = 0.74, ηp^2 = .002]. Pour mieux étudier cet effet d'interaction, nous avons utilisé des régressions multiples, avec méthode d'entrée, pour prédire le gain d'apprentissage entre les exercices d'estimation pré-test et post-test, en utilisant un modèle avec SoPA, pour les profils de chaque apprenant (voir tableau 9).

Ces analyses ont révélé une capacité de prédiction du SoPA dans le gain d'apprentissage, uniquement pour les participants observant le profil réaliste de l'apprenant.

Tableau 9

Régressions linéaires multiples sur le gain d'apprentissage, en utilisant le SoPA comme modèle prédictif.

Modèles		Standardized	t	p	Corrélations partielles	F	p	R^2 ajusté
Profil Aléatoire	Intercept		1.56	0.12	—0.16	F(1.91) = 2.28	0.13	0.01
	SoPA	—0.16	— 1.51	0.13				
Profil Réaliste	Intercept		— 2.15	0.03	0.24 *	F(1.93) = 5.81	0.02	0.05
	SoPA	0.24	2.41	0.02				
Profil Expert	Intercept		0.30	0.77	0.05	F(1.90) = 0.22	0.64	— 0.01
	SoPA	0.05	0.47	0.64				

2.2.3.3 Discussion

Afin de tester l'hypothèse de la précédente étude, nous avons reproduit le paradigme de pré-test/post-test autour de l'activité "Hooks and Shifts" mais en utilisant une vidéo comme support à l'apprentissage. Cela nous a permis de limiter l'agentivité locale des participants sur la situation en les rendant observateurs. Ainsi, ils ne pouvaient pas bénéficier d'une interaction directe ou d'une réflexion guidée par l'expérimentateur, et devaient se reposer sur un apprentissage par observation.

Comme notre hypothèse portait sur le lien entre l'agentivité globale et les situations de "Shift", nous avons utilisé trois vidéos, en fonction des profils d'apprenants présentés aux participants. Un profil aléatoire, ne montrant aucune progression et des retours d'information incorrects sur la résolution de problème. Un profil réaliste, montrant une progression normale avec des retours d'informations progressivement meilleurs. Un profil expert, ne montrant aucune progression mais des retours d'informations toujours corrects. Cette manipulation expérimentale a servi à fournir des situations de "Shifts" uniquement dans le profil réaliste et à s'assurer que l'utilisation d'un retour d'information correct uniquement ne serait pas suffisante pour améliorer l'apprentissage par observation.

Notre prédiction était que les participants auraient un gain d'apprentissage en observant l'activité "Hooks and Shifts", en fonction des facteurs d'agentivité globale (SoPA et SoNA) mais seulement lorsqu'ils ont la possibilité d'observer des situations de "Shift" (condition de profil d'apprenant réaliste). Nos résultats ont confirmé cette prédiction en révélant un effet significatif du SoPA dans le gain d'apprentissage, uniquement lors de l'observation du profil réaliste. En outre, les participants ont ressenti plus d'apprentissage et ont adopté davantage le point de vue de l'apprenant observé avec le profil réaliste. Dans l'ensemble, cette étude met en avant une influence de l'agentivité globale sur l'apprentissage par observation, pour lequel l'agentivité locale est limitée.

ÉTUDE 4

Résumé : Afin d'étudier l'influence du sens de l'agentivité sur l'apprentissage, nous avons utilisé la même méthode d'apprentissage "Hook and Shift" mais la réalité virtuelle n'a pas été utilisée. Dans cette étude, l'apprentissage était basé sur l'observation d'une vidéo montrant un avatar réalisant l'activité "Hooks and Shifts". Ils ne pouvaient pas bénéficier d'une interaction directe ou d'une réflexion guidée par l'expérimentateur, et devaient se reposer sur un apprentissage par observation. Cela nous a permis de limiter l'agentivité locale des participants sur la situation. De plus, l'apprentissage possible par l'observation de la vidéo a été contrôlé en utilisant différents profils d'apprenants (aléatoire, réaliste, expert) réalisant l'activité. Les résultats semblent montrer un effet de l'agentivité globale, au travers de son facteur d'agentivité globale positive (SoPA) sur l'apprentissage, mais uniquement lorsque les participants (277 étudiants de L1 Psychologie) avaient accès une progression réaliste dans l'activité. Ces résultats mettent en avant une influence de l'agentivité globale sur l'apprentissage par observation, pour lequel l'agentivité locale est limitée.

⟶ **Valorisation :** Article original accepté dans le journal "L'Année Psychologique / Topics in Cognitive Psychology" - *"I know what you mean" : Investigating the Sense of Agency in Learning an abstract Mathematical Knowledge using a Constructivist Method in Virtual Reality* - Auteurs : J.-C. Hurault, A. Tedesco et L. Brunel, 2021)

2.2.4 Synthèse de l'axe 2

Dans l'ensemble, les résultats des études de l'axe 2 apportent des réponses quant à l'influence du sens de l'agentivité sur l'apprentissage. De plus, ces études apportent également des réponses à un deuxième objectif, fournir des preuves de gain d'apprentissage pour la méthode "Hooks and Shifts" et développer une activité efficace pour faciliter l'apprentissage des mathématiques auprès d'un public étudiant.

Cet objectif connexe fait écho aux nombreux appels et réformes en faveur du développement de méthodes pédagogiques constructivistes pour enseigner et promouvoir l'apprentissage de connaissances. D'un intérêt particulier, nous avons choisi d'orienter ces études autour de la construction de connaissances mathématiques abstraites. La moyenne arithmétique nous a semblé un bon point de départ, car il s'agit d'une connaissance élémentaire et centrale dans les programmes universitaires, notamment en psychologie. De plus, nous avons choisi de développer l'activité d'apprentissage à partir de la technologie immersive de réalité virtuelle, car elle est source d'avenirs prometteurs pour l'apprentissage médiatisé par la technologie.

Concernant notre objectif principal, il s'agissait d'étudier l'influence du niveau d'agentivité globale lors d'un apprentissage. À partir de la méthode "Hooks and Shifts", nous avons réalisé l'étude 3, dans laquelle la situation permet de passer d'une activité uniquement sensorimotrice vers une connaissance abstraite par l'introduction graduelle de signes abstraits ainsi que des phases de réflexion. Les résultats n'ont pas montré de liens entre les facteurs d'agentivité globale (SoPA et SoNA) et les mesures d'apprentissage, qu'il s'agisse de la progression aux estimations lors de l'activité "Hooks and Shifts" ou des gains d'apprentissage lors de la comparaison pré-test/post-test.

Cela infirme ainsi notre hypothèse principale pour cette étude. Nous prédisions des gains d'apprentissage plus importants chez les étudiants ayant une plus grande tendance à se sentir agents, révélés par l'échelle F-SoAS. Ainsi, il est possible que l'agentivité locale, facilitée par la méthode active "Hooks and Shifts" et les capacités d'interaction et d'immersion de la RV, est rendu ce facteur non significatif sur cet apprentissage. Le faible nombre de participants aurait pu néanmoins empêcher d'obtenir un effet significatif, impliquant que l'effet potentiel de l'agentivité globale serait faible ou moyen.

L'étude 4 permet d'apporter des réponses à cela en reproduisant le paradigme de l'étude 3 mais en limitant la possibilité d'agentivité locale. Les participants étaient des observateurs et ne pouvaient pas bénéficier d'une interaction directe ou des incitations à la réflexion par l'expérimentateur. De plus, la progression observée par les participants

a été contrôlée afin de vérifier son influence sur l'apprentissage, notamment en lien avec l'agentivité. Les résultats de cette étude 4 ont confirmé un effet significatif du facteur d'agentivité globale positive sur le gain d'apprentissage, mais uniquement lors de l'observation du profil réaliste de progression à l'activité.

Les questions relatives à la perception de la vidéo auprès des participants offrent des pistes d'interprétation quant à cet effet. Les participants ont ressenti davantage d'apprentissages et ont adopté davantage le point de vue de l'apprenant observé avec le profil réaliste. Cela pourrait indiquer que cet apprentissage a bénéficié aux participants, selon leur niveau d'agentivité globale positive, grâce à une meilleure prise de perspective. Les participants pourraient alors ressentir une plus forte agentivité locale pour une activité observée. Cependant, l'agentivité globale n'a pas montré d'influence significative sur l'apprentissage lors de l'étude 3. Ainsi, la différence pourrait résider dans l'auto-réflexion soutenue dans l'étude 3, contrairement à l'étude 4. Les participants ayant eu de meilleurs gains d'apprentissage selon leur niveau d'agentivité globale positive auraient pu bénéficier d'une meilleure capacité d'auto-réflexion lors de l'apprentissage par observation. Ces explications restent cependant fortement spéculatives et les études soumises à des limites. Nous reviendrons ainsi sur cela, mais également sur les perspectives qu'elles apportent, lors de la discussion générale.

Enfin, pour revenir sur l'objectif secondaire, mais néanmoins important et prometteur, les résultats ont montré un effet de la méthode "Hooks and Shifts" pour l'apprentissage de la moyenne arithmétique par une activité en RV. Pour rappel, cet l'apprentissage s'opérationnalise par une dialectique entre les situations "Hooks", où les apprenants articulent d'abord une stratégie pour résoudre le problème en utilisant un artefact, et les situations "Shifts", où de nouvelles stratégies et compréhensions émergent par la mise en œuvre de signes abstraits et la réflexion. Cela conforte l'intérêt d'utiliser l'approche constructiviste pour aider au développement de connaissances abstraites, notamment opérationnaliser par des méthodes telles que "Hooks and Shifts" et en utilisant la réalité virtuelle. Nous reviendrons également sur les limites et perspectives de cela au travers de la discussion générale ci-après.

Chapitre 3

DISCUSSION GÉNÉRALE

3.1 Rappel de la problématique

Cette thèse a pour objectif d'apporter des éléments de compréhension quant au rôle du sens de l'agentivité dans le processus d'apprentissage.

Pour cela, nous sommes partis d'une vision constructiviste de l'apprentissage, mettant l'expérience individuelle au cœur de toute construction de connaissance. L'apprenant est au centre du processus, ce qui nous amène à questionner sa place en tant qu'agent. Ainsi, il s'est posé la question de savoir comment définir l'agentivité et par quel moyen elle peut se mesurer. Étant limité par les mesures actuelles (centrées sur une situation particulière) le premier objectif de nos recherches a été d'adapter la seule mesure qui permet actuellement de refléter l'ensemble des croyances sur l'agentivité, que nous avons qualifié de "trait dispositionnel". Cette échelle nous a également offert un nouvel angle pour étudier le lien entre les différents mécanismes, à la fois cognitif et sensorimoteur, d'agentivité.

À partir des travaux portant sur l'échelle, nous avons inséré cette mesure lors d'une activité d'apprentissage afin de répondre à notre deuxième objectif qui est de comprendre l'impact du trait dispositionnel et de son apport sur une méthode d'apprentissage.

L'idée de ces travaux est de faciliter la recherche sur l'influence de l'agentivité dans le processus d'apprentissage et de montrer sa pertinence lors de la conception d'activités pédagogiques.

Plusieurs de nos travaux ont utilisé l'outil de réalité virtuelle afin de réaliser les expériences. S'il est important de noter que notre thèse n'a pas eu vocation à améliorer notre compréhension sur le potentiel de cet outil dans l'apprentissage, en revanche, elle a été un outil pertinent pour la réalisation de nos travaux. À travers cet outil, nous avons réalisé l'objectif mineur, mais néanmoins présent, de contribuer à l'intérêt de la réalité virtuelle dans l'apprentissage et la recherche.

3.2 Synthèse de nos recherches

3.2.1 Synthèse de l'état de l'art

Pour construire au mieux la partie expérimentale de notre thèse, nous nous sommes, dans un premier temps, intéressés à l'état de l'art. Le cadre théorique, proposé dans cette thèse, s'est d'abord intéressé à la théorie idéomotrice, décrivant notamment un principe d'intégration des associations sensorimotrices qui va permettre d'orienter la réalisation et la sélection des futures actions selon les conséquences désirées, ou intentions. La cognition va émerger afin de permettre une coordination de l'ensemble des traces mnésiques pour permettre une adaptation fonctionnelle de l'individu à son environnement. Une approche particulière de l'apprentissage, le constructivisme, a ensuite été proposée. Elle a été choisie de par l'adhésion grandissante dont elle fait preuve dans l'éducation et la formation, s'expliquant par sa capacité à proposer une vision de l'apprentissage cohérente avec les dernières recherches en sciences cognitives. Elle considère qu'une connaissance se fonde obligatoirement sur l'action, qu'il sera nécessaire de choisir et de guider pour permettre à l'apprenant de construire un sens et lui donner une place dans l'ensemble ses constructions précédentes. En cohérence avec notre approche d'une cognition fondée uniquement sur des modalités sensorimotrices, nous avons décrit le principe d'appariement global des traces mnésiques permettant de produire de l'abstraction. Ce principe explique la construction de connaissances plus ou moins abstraites, à partir de la répétition et la création de similitudes entre plusieurs traces ou événements.

L'approche constructiviste de l'apprentissage est au cœur de ces recherches et réflexions sur l'influence de l'agentivité dans la construction de connaissances. Les caractéristiques et l'expérience de l'individu ont un rôle important dans le processus d'apprentissage. Une situation nouvelle va nécessiter d'être réconciliée avec les connaissances et expériences précédentes, mais aussi amener à changer les croyances ou à rejeter la nouvelle information, jugée non pertinente. Mettant l'individu, et ses croyances, au centre de l'apprentissage, cette approche nous a servi dans ces travaux de thèse afin de choisir une méthode pédagogique et concevoir une activité d'apprentissage cohérente avec nos objectifs. En effet, on ne s'est pas intéressé à la meilleure méthode d'apprentissage, mais plutôt à la place de l'agentivité dans l'apprentissage. Plus particulièrement, on s'est demandé si la tendance de l'apprenant à l'agentivité va influencer la manière dont il va apprendre et le gain qu'il fera d'une situation d'apprentissage.

Dans un deuxième temps, il a été nécessaire de s'intéresser à l'état de l'art portant sur l'agentivité. De manière plus précise, la notion de disposition individuelle à l'agentivité est développée dans cette thèse à partir d'une approche prometteuse de l'agentivité, l'approche intégrative (Synofzik et al., 2008, 2013). Cette capacité spécifique à ressentir et construire une distinction entre soi et le monde, va définir le « je » à l'origine d'un événement dans le monde et permettre d'attribuer une origine causale aux événements (Haggard, 2017). L'approche intégrative permet de rendre compte de façon parcimonieuse d'un niveau d'agentivité basé sur le traitement d'indices d'action (sensorimotrices) et d'un autre, basé sur des indices cognitifs, incluant l'environnement extérieur, au travers de différents processus opérant à des différents moments de l'action : avant celle-ci (processus prédictifs) et après celle-ci (processus postdictifs). Ces niveaux d'agentivité se reflètent avec le sentiment d'agentivité, inconscient et traitant principalement les indices sensorimoteurs, puis avec le jugement d'agentivité, conscient et traitant à la fois le sentiment d'agentivité et les indices cognitifs. L'intégration sensorimotrice entre une action et ses conséquences (apprentissage idéomoteur) va être à la base du sentiment d'agentivité (Spengler et al., 2009).

L'étude du sens d'agentivité repose sur deux types de mesures. D'un côté, des mesures indirectes sur les paramètres de contrôle d'une action en cours, centrées sur le sentiment d'agentivité. De l'autre, des mesures directes sur la perception consciente de soi comme agent causal dans un contexte donné, centrées sur le jugement d'agentivité (Haggard, 2017). Cependant, les recherches se sont concentrées sur les mesures indirectes pour refléter l'agentivité, vues comme plus fiables que les mesures directes. Les études quant aux liens entre ces mesures (reflétant les deux niveaux d'agentivité) sont encore difficiles à concilier. De plus, dans les deux cas, les mesures proposées impliquent le contrôle de ses actions et de leurs conséquences dans une situation particulière, reflétant une agentivité locale. Ces mesures ne permettent pas d'estimer l'ensemble des croyances sur son agentivité faisant émerger une croyance stable de notre degré général d'agentivité, indépendamment d'une situation particulière.

Cette approche est notamment soutenue par l'étude de Tapal et al. (2017), ayant développé une échelle de mesure directement orientée sur un niveau d'agentivité globale (ou dispositionnelle) stable chez les individus. Cette échelle, nommée Sense of Agency Scale (SoAS) semble être un moyen approprié d'évaluer spécifiquement l'agentivité globale au travers de deux facteurs distincts. D'un côté, le facteur d'agentivité globale positive (Sense of Positive Agency - SoPA) indique le niveau de contrôle sur le corps, l'esprit et l'environnement ressenti par un individu. De l'autre, le facteur d'agentivité globale négative (Sense of Negative Agency - SoNA) indique le manque de contrôle sur le corps, l'esprit et l'environnement ressenti par un individu.

Ainsi, le SoPA semble concerner l'autonomie personnelle et la responsabilité de nos actions tandis que le SoNA semble concerner le fatalisme et l'impuissance existentielle (pour plus de détails sur ces distinctions, voir l'étude 2 de Tapal et al., 2017).

Ces recherches nous ont permis d'adapter cette mesure, en français, qui a le potentiel de contribuer à réunir les résultats de l'agentivité de manière cohérente. Ces recherches ont également contribué à faire des liens entre les mécanismes prédictifs et postdictifs et cette mesure.

Cette échelle se distingue d'autres approches dispositionnelles sur l'apprentissage. En reflétant directement l'agentivité et ses mécanismes qui pourraient offrir un outil précieux pour faire un lien entre des capacités locales d'intégration sensorimotrice et cette disposition individuelle d'un côté, et leurs influences sur l'apprentissage de l'autre. Ce champ de recherche nous a permis de de proposer un lien entre cette mesure globale de l'agentivité et une méthode d'apprentissage constructiviste particulière ("Hook and Shift").

Lors de la réflexion sur la conception d'une situation d'apprentissage, afin de tester l'influence de l'agentivité, la question du choix de l'outil s'est posée. L'état de l'art nous a permis de porter notre choix sur l'outil de réalité virtuelle. Elle favorise la motivation, ce qui conduit à un plus grand engagement sur l'activité d'apprentissage et améliore les résultats de l'apprentissage (Jensen & Konradsen, 2018 ; Passig et al., 2016 ; Alhalabi, 2016 ; Meyer et al., 2019). Ses principaux avantages sont l'aspect immersif et interactif, rendant l'approche constructiviste possible et efficace en termes de gains d'apprentissage (Fromm et al., 2021). En effet, un modèle récent basé sur la recherche de l'apprentissage avec la RV, appelé CAMIL (Cognitive Affective Model of Immersive Learning - Makransky & Petersen, 2021), propose que l'immersion et l'interaction génèrent, respectivement, des sentiments de présence et d'agentivité pour les utilisateurs, ayant la possibilité de faciliter l'apprentissage si l'on choisit une méthode d'apprentissage appropriée.

En accord avec la théorie constructiviste, la RV permet l'utilisation du corps et l'aspect sensoriel servira d'ancrage fort à la cognition. Concernant notre étude, la RV nous a offert des possibilités d'interaction essentielles (Fuchs, 2017).

3.2.2 Synthèse de l'expérimentation

À partir de ces éléments théoriques, nous avons construit nos deux axes expérimentaux répondant chacun à des besoins distincts, mais complémentaires.

Dans notre premier axe, il a été question de réaliser deux études : une première qui consistait à traduire l'échelle d'agentivité globale en français afin de pouvoir l'utiliser dans un contexte d'apprentissage, et une deuxième qui consistait, elle, à explorer les liens entre cette échelle et les différentes mesures d'agentivité locales. Pour cela, après avoir effectué une traduction de l'échelle SoAS de Tapal en français, nous avons réalisé les deux études de validation. La première était basée sur des analyses factorielles exploratoires et confirmatoires afin de valider la structure bifactorielle du F-SoAS, à savoir le facteur d'agentivité globale positive (SoPA) et le facteur d'agentivité globale négative (SoNA). Nous avons administré l'échelle traduite, nommée F-SoAS (French - Sense of Agency Scale), auprès d'un échantillon de 517 participants francophones. Les résultats des analyses factorielles sont conformes au modèle à deux facteurs validé par Tapal et al. (2017), ce qui renforce d'autant plus la proposition d'une agentivité "chronique" multidimensionnelle, pouvant servir à mesurer une tendance dispositionnelle d'agentivité chez les individus.

Ensuite, nous avons réalisé une autre étude afin d'effectuer une validation externe de cette mesure en la comparant avec d'autres mesures d'agentivité. Nous avons utilisé principalement la mesure de liaison intentionnelle, développée par Haggard et al. (2002), permettant d'estimer le niveau sensorimoteur de l'agentivité (sentiment d'agentivité), et l'avons accompagnée d'une mesure de jugement d'agentivité. Cela a permis d'explorer les éventuels mécanismes communs entre une approche locale de l'agentivité et une approche globale.

Ces mécanismes ont pu être mis en évidence en distinguant l'influence des indices de préparation de l'action (prédictifs) de celle des indices de traitement des conséquences et du contexte (postdictifs). Les résultats, auprès de 32 participants, ont montré des liens différents entre ces différentes mesures et les facteurs d'agentivité globale. En effet, le facteur d'agentivité globale positive (SoPA) apparaît associé aux processus prédictifs, un plus fort niveau de SoPA étant lié à plus grande importance accordée à ce processus pour générer un sentiment d'agentivité. De plus, le facteur d'agentivité globale négative (SoNA) apparaît associé aux processus postdictifs, un plus fort niveau de SoNA étant associé à des jugements d'agentivité plus faibles.

Ce premier axe permet de valider la structure conceptuelle de l'agentivité globale séparable en deux facteurs distincts. Ceci ouvre des perspectives pour mieux comprendre les résultats parfois ambigus quant aux liens entre les mesures directes/indirectes de l'agentivité et l'importance que peuvent avoir les différents indices d'agentivité selon cette disposition à l'agentivité. Il permet aussi d'apporter notre principal outil de mesure de l'agentivité lors de l'apprentissage pour le second axe.

Dans notre deuxième axe, il a été question de réaliser deux études. Nous avons testé l'effet du sens de l'agentivité globale au travers de la méthode "Hook and Shift" (Abrahamson et al., 2011), adaptée à l'apprentissage d'une connaissance mathématique abstraite de la moyenne, auprès d'une population étudiante de première année en Psychologie. La méthode a été utilisée dans le contexte d'une situation d'apprentissage en réalité virtuelle dans laquelle les apprenants pouvaient utiliser leurs interactions afin d'estimer le point d'équilibre de différentes planches, construites comme des métaphores analogiques supportant la compréhension de la moyenne arithmétique. L'apprentissage a été mesuré grâce à un paradigme de pré-test/post-test impliquant des tâches de vérification et d'estimation de moyenne.

La première étude a permis d'étudier le sens de l'agentivité dans un contexte direct et relativement écologique d'un apprentissage constructiviste auprès de 24 étudiants. C'est-à-dire que l'apprenant pouvait construire directement sa connaissance à partir d'une activité sensorimotrice, guidé par l'expérimentateur, avec la méthode. Les résultats ont montré un effet de la méthode sur les gains d'apprentissage. Opérationnalisant l'apprentissage à travers une dialectique entre les situations "Hooks", où les apprenants articulent d'abord une stratégie pour résoudre le problème en utilisant un artefact, et les situations "Shifts", où de nouvelles stratégies et compréhensions émergent par la mise en œuvre de signes abstraits et la réflexion, la méthode a permis un gain d'apprentissage. De plus, ce gain a été produit sur un autre contexte d'application de connaissance de la moyenne, montrant une transférabilité des connaissances qui pourrait indiquer la construction d'une connaissance plus abstraite sur la moyenne arithmétique. Ces résultats confortent ainsi l'intérêt d'utiliser l'approche constructiviste pour aider au développement de connaissance abstraite, notamment opérationnalisée par des méthodes telles que “Hooks and Shifts” et en utilisant la réalité virtuelle.

Pour autant, ces résultats ne permettent pas d'apporter des réponses quant à l'influence qu'aurait pu avoir l'agentivité sur cette construction de connaissances. En effet, tandis que nous avons prédit des gains plus importants pour les apprenants ayant une plus grande tendance à se sentir agents, les résultats n'ont pas confirmé cela. Il est possible que l'agentivité locale, liée au niveau sensorimoteur (Synofzik et al., 2008), ait entravé

ou empêché une influence directe de l'agentivité globale sur cette activité sensorimotrice directe. Les participants bénéficient d'une interaction spécifique, permise par la RV et la méthode constructiviste, qui auraient conduit à l'expérience d'un fort sentiment d'agentivité, comme le propose le modèle CAMIL pour l'apprentissage avec la RV (Makransky & Petersen, 2021).

Au regard de la difficulté à interpréter une absence de significativité, nous avons conduit l'étude 4 afin de contrôler certains paramètres de l'apprentissage pour mesurer l'influence de l'agentivité globale. Nous avons adapté la procédure de l'étude précédente afin que les participants ne puissent pas éprouver d'agentivité locale sur l'activité. Les participants étaient des observateurs et ne pouvaient pas bénéficier d'une interaction directe ou des incitations à la réflexion par l'expérimentateur.

Dans cette étude 4, réalisée auprès de 277 étudiants de première année de psychologie, les participants ont suivi la même procédure de pré-test/post-test, la différence étant qu'ils ont regardé une vidéo de l'activité "Hooks and Shifts" au lieu de la réaliser directement. Afin de contrôler l'importance de la progression observée par les participants, nous avons comparé trois vidéos de la même activité, montrant chacun un profil d'apprenants différents (aléatoire, réaliste ou expert). Seul le profil réaliste montrait une progression à l'activité, tandis que le profil aléatoire ne montrait aucune estimation correcte à l'activité et le profil expert montrait uniquement des estimations correctes. Le profil expert a permis de s'assurer que l'accès aux estimations correctes ne serait pas suffisant pour améliorer l'apprentissage par observation. Nos résultats ont confirmé un effet prédictif significatif du facteur d'agentivité globale positive sur le gain d'apprentissage, uniquement lors de l'observation du profil réaliste. De plus, les résultats aux questions relatives à l'observation de la vidéo indiquent que les participants ont ressenti plus d'apprentissages et ont adopté davantage le point de vue de l'apprenant observé avec le profil réaliste.

3.3 Réponses à la problématique

L'ensemble des éléments présentés dans ce travail de thèse nous amène à apporter une réponse à notre question initiale portant sur le rôle du sens de l'agentivité dans le processus d'apprentissage.

Il a été supposé que le sens de l'agentivité va être impliqué dans l'ensemble de nos interactions et pouvoir servir de marqueur mnésique spécifiant les expériences et connaissances sur lesquelles nous avons eu et pourrions avoir un contrôle. Autrement dit, une agentivité, locale, renvoie à la capacité de contrôle et de détection des conséquences de nos actions sur l'environnement. Elle est donc dépendante de la situation, mais aussi des connaissances et expériences précédentes. Cette agentivité va s'inscrire dans les traces mnésiques de nos expériences, au même titre que l'ensemble des modalités sensorimotrices perçues par l'individu. Il est alors probable que notre connaissance sur notre agentivité globale reflète l'ensemble des traces relatives à notre agentivité.

Du reste, il a été supposé que l'apprenant, par le biais d'une expérience active dans une situation pédagogique, construit ses connaissances. La valeur du constructivisme découle de l'apprentissage intentionnel, et pas seulement de l'engagement dans l'expérience. Cette perspective met l'accent sur le rôle joué par l'intention, suggérant que les personnes construisent des connaissances qui sont pertinentes pour atteindre un objectif d'apprentissage actuel et en fonction de leur réflexion.

Bien qu'une connaissance soit nécessairement associée à une situation particulière, la capacité d'abstraction nécessite une séparation entre notre point de vue actuel et d'autres perspectives pour créer des similitudes entre elles. L'apprentissage peut être vu comme la dynamique d'adaptation entre stabilité et changement, ou, selon les termes piagétiens, entre assimilation et accommodation. Construire une connaissance passe par des assimilations de la situation à soi-même (par ex., connaissances, croyances, affordances, etc.) pour créer une stabilité, une cohérence du monde. Ajoutons que cette construction doit également passer par des accommodations, où l'on dépasse sa propre implication immédiate et où l'on adopte d'autres points de vue. Cela permet d'agir en tant que médiateur de sa propre activité, ou de s'identifier aux autres, et "d'agir" à travers eux, réduisant son contrôle actuel, mais permettant le changement et l'apprentissage (Ackermann et al., 1996).

On peut distinguer deux processus distincts de prise de recul sur la situation immédiate, appelés distanciation et identification (Gillespie, 2007). La distanciation implique un recul sur sa propre situation pour réfléchir à celle-ci, c'est-à-dire une auto-réflexion. Tandis que l'identification implique un recul sur sa propre situation pour une participation à la situation de quelqu'un d'autre, c'est-à-dire une prise de perspective.

Il en découle qu'un premier lien entre le sens de l'agentivité et l'apprentissage semble être dans la prise de perspective. Ainsi qu'en témoigne l'étude 4, les apprenants observant des situations de "Shifts" pourraient être capables d'apprendre en fonction de leur niveau d'agentivité globale positive. Le fait de se sentir plus agents leur permet de mieux embrasser la perspective des autres, ce qui conduit à une meilleure intégration et à un meilleur apprentissage à partir de l'apprentissage observé. Dans ce cas, notre agentivité globale, ou connaissance quant à notre capacité d'agir au-delà d'un contexte particulier, servirait à mieux distinguer notre agentivité et possiblement à s'en détacher. Un certain niveau d'agentivité globale indiquerait une facilité à se tenir à l'écart de la situation immédiate et être motivé par des préoccupations dépassant la situation, comme un objectif lointain, une connaissance abstraite ou le point de vue de quelqu'un d'autre.

Un deuxième lien, possiblement cumulatif, est que l'agentivité semble être associée à une meilleure capacité de réflexion sur les situations d'apprentissage et donc des facilités d'abstractions. En effet, les apprenants de l'étude 3, ont été amenés à combiner des connaissances et des compétences antérieures tout en prenant des décisions immédiates, alors que les apprenants observateurs dans l'étude 4, ayant une expérience à distance, ont eu le temps de créer des similitudes et des réflexions sur la connaissance.

L'apprentissage pourrait alors bénéficier de cette capacité à “naviguer” entre les différents points de vue et pouvoir réfléchir sur leurs liens afin de permettre un équilibre viable entre stabilité et changement, entre assimilation et accommodation. En cela, l'agentivité globale refléterait plutôt la capacité d'accommodation des apprenants, tandis que l'agentivité locale serait associée à l'assimilation.

3.4 Limites de la recherche

3.4.1 Limites de l'étude 1

Les travaux réalisés au travers de l'axe 1 avaient pour objectif d'étudier une nouvelle mesure de l'agentivité, approchée comme un trait individuel indiquant un ressenti global d'agentivité, indépendant d'une situation particulière. Cette approche apparaît pertinente pour, d'un côté étudier les liens entre les différents niveaux contextuels d'agentivité, tels que le sentiment et le jugement d'agentivité, de l'autre, elle offre une mesure "prédictive" pour évaluer les liens entre l'agentivité et les comportements ou réflexions lors d'une situation, telle que l'apprentissage étudié avec l'axe 2. Cependant, la validation de l'échelle effectuée par le premier axe comporte certaines limites.

Pour l'étude 1, la principale limite concerne les propriétés psychométriques de l'échelle d'agentivité globale, F-SoAS. Malgré le fait que ses propriétés soient acceptables, la validité de construction, montrant que l'échelle mesure bien que les notions qu'elle est censée mesurer reste relativement faibles dans notre étude. Cette faiblesse de validité s'explique principalement par deux raisons principales. La première raison serait que l'échelle n'offre pas une mesure pleinement adéquate du modèle théorique sous-jacent, à savoir une distinction factorielle entre un sens d'agentivité globale positive et négative. Cela impliquerait une révision de l'échelle afin qu'elle puisse offrir une mesure dont la validité sera satisfaisante. La deuxième raison serait que le modèle théorique sur lequel elle s'appuie n'est pas adéquat. À la lumière de l'étude 2 et de l'étude 4, ayant confirmé par de premières données empiriques des effets distincts entre les deux facteurs d'agentivité globale, cette deuxième raison nous semble moins probable. De plus, cette faiblesse de la validité du modèle pourrait être due au faible nombre d'items retenus pour l'échelle (passage de 13 items pour l'échelle originale à 7 items) limitant statistiquement cette validité. Cette réduction d'items peut s'expliquer par leurs formulations qui auraient pu avoir un impact sur les réponses des participants.

Notons que pour l'item 02 (*"Je ne suis qu'un outil dans les mains de quelqu'un ou quelque chose."*), il est possible que l'idée d'être guidé par une main "invisible" et "toute puissance" puisse faire écho à différentes croyances selon les personnes (par ex., dieux, conspiration...). D'autres items auraient pu induire une confusion par leur formulation, par exemple l'item 10 (*"Rien de ce que je fais n'est vraiment volontaire."*) peut avoir rendu la phrase difficile à comprendre de par l'utilisation d'une phrase à double négation (pour un détail des autres items enlevés, voir Hurault et al., 2020). Il pourrait donc être pertinent de mener des entretiens qualitatifs afin d'identifier et d'ajuster les problèmes de traduction ou d'adaptation restants.

D'autres limites concerne le fait que nous n'avons pas traduit directement le SoAS à partir de l'hébreu, mais à partir de la traduction anglaise fournie par les auteurs originaux (Tapal et al., 2017). Une étude de la validité d'une traduction anglaise, avec un échantillon de natifs anglophones, permettrait de renforcer nos résultats, et d'étendre la portée du SoAS. Enfin, d'autres études psychométriques avec un échantillon plus important sont nécessaires pour développer des matériaux standards, calibrés et adaptés aux populations masculines et féminines.

Comme nous l'aborderons dans la prochaine partie "perspective", d'autres validations restent nécessaires, conformément aux normes recommandées pour la construction et l'adaptation des tests (Association et al., 2014 ; Commission et al., 2014).

3.4.2 Limites de l'étude 2

Pour l'étude 2, nous avons étudié la validité de l'échelle en analysant les corrélations entre ses facteurs (agentivité globale positive et négative) et des mesures de l'agentivité locale, tant directe qu'indirecte. Cela a permis d'améliorer notre compréhension du sens de l'agentivité au travers de l'étude de ses différentes mesures et inversement, mais elle comporte plusieurs limites qu'il est important de souligner.

La principale limite concerne, tout d'abord, l'absence d'expérimentation qui auraient permis d'apporter des preuves plus convaincantes quant aux liens des dimensions d'agentivité globale positive et négative, avec respectivement, le rapprochement temporel (liaison intentionnelle) et les jugements d'agentivité. Concernant les liens entre l'agentivité globale positive et le sentiment d'agentivité, mesurés par le rapprochement temporel entre l'action et sa conséquence, les résultats de l'étude 3 montrent que les participants ayant un plus fort niveau d'agentivité globale positive ont tendance à percevoir la conséquence de leur action comme moins proche de leur action.

Cette corrélation négative entre les deux, a priori contradictoire avec la théorie, peut s'expliquer par l'utilisation de délai aléatoire pour l'apparition de la conséquence, la rendant imprédictible pour le participant. Ainsi, le traitement d'un stimulus comme une conséquence de notre action dépendrait d'autant plus de notre capacité à le prédire lorsque l'on se considère plus agent dans nos interactions en général. Cette interprétation est également renforcée par le lien significatif entre la variabilité des estimations temporelles et l'agentivité globale positive, tendant à montrer que, dans cette situation de conséquence imprédictible, les participants se basent plus sur leurs indices prédictifs internes.

Cependant, elle demande de reproduire l'étude en utilisant un délai fixe entre l'action et l'apparition de la conséquence, afin de rétablir la fiabilité des indices prédictifs.

Si les participants montrent une corrélation positive entre le rapprochement temporel et le niveau d'agentivité globale positive, cela renforcerait notre hypothèse sur l'importance, pour les personnes ayant un fort niveau d'agentivité globale positive, des indices prédictifs lors de l'intégration des conséquences de ses actions.

Au contraire, si aucun lien n'est trouvé, alors l'agentivité globale positive pourrait influencer l'intégration de conséquence de ses actions uniquement lorsque celle-ci n'est pas prédictible.

Cette question est importante, car dans le premier cas, l'agentivité globale positive pourrait être un indice prépondérant utilisé par les mécanismes d'agentivité alors que dans le second cas, elle serait un indice secondaire, utilisé lorsque les indices postdictifs ne sont pas fiables.

Concernant maintenant les liens entre l'agentivité globale négative et le jugement d'agentivité, les résultats semblent indiquer une corrélation négative entre eux. Nous notons que ce lien n'atteint pas le seuil de significativité et n'est présent que lorsque la tâche est focalisée sur la conséquence, indiquant que plus l'agentivité globale négative est élevée et plus les jugements d'agentivité sont faibles. Notre interprétation est que l'agentivité globale négative repose plutôt sur l'activation de croyances lorsque l'attention est orientée vers les conséquences, imprédictibles, de ses actions. Ces croyances faciliteraient alors des jugements d'agentivité faibles, indépendamment du sentiment d'agentivité. Une forte agentivité globale négative pourrait renvoyer à une tendance à se reposer principalement sur les indices contextuels pour juger son agentivité, dans les situations d'ambiguïté entre le lien action-conséquence. Cette hypothèse nécessiterait une expérience spécifique pour être confirmée.

Nous pensons par exemple à une réplication du paradigme de Aarts et al. (2005) où les participants doivent déplacer un carré traversant rapidement un chemin rectangulaire en maintenant une touche. Au même moment, l'ordinateur déplace indépendamment un autre carré gris à la même vitesse, mais dans la direction opposée. Les participants peuvent ensuite arrêter tout mouvement, faisant apparaître un carré sur une position du rectangle, correspondant soit à la position attendue par le carré du participant ou celui de l'ordinateur. La tâche a été conçue pour rendre ambiguë l'origine de la conséquence. Il serait possible de comparer différentes conditions selon le niveau de contrôle réel du participant sur la conséquence (par ex., 100%, 50% et 0% de contrôle) avec les jugements d'agentivité

des participants sur chaque essai et utiliser la mesure de leur agentivité globale comme prédicteur. On pourrait s'attendre à ce qu'un niveau d'agentivité globale négative plus élevé prédise des jugements d'agentivité plus faible, indépendamment de la réelle capacité de contrôle du participant. Cela renforcerait l'hypothèse d'une influence de l'agentivité globale négative sur l'importance des indices contextuels dans le traitement de l'agentivité.

Ainsi, l'agentivité globale semble refléter des tendances générales de traitement des indices d'agentivité, par laquelle il serait possible de distinguer l'importance des mécanismes principaux d'agentivité selon les individus et la situation. Cependant, des études sont nécessaires pour valider, ou non, ces hypothèses.

3.4.3 Limites de l'étude 3

Les travaux réalisés au travers de l'axe 2 avaient pour objectif d'étudier les liens entre le sens de l'agentivité et l'apprentissage. Pour cela, nous avons conçu une activité de résolution de problèmes utilisant la méthode "Hooks and Shifts". Dans cette dernière, les apprenants construisent une connaissance abstraite en créant des similitudes entre l'activité et des exercices reposant sur cette connaissance, au travers d'un processus d'abstraction. Les résultats de l'étude 3 ont bien indiqué que cette activité a induit un gain d'apprentissage, montrant que la connaissance apprise a pu être transférée entre les deux situations.

Pour autant, aucun lien direct entre la progression des participants à l'activité et les facteurs d'agentivité globale ni entre ces derniers et le gain d'apprentissage n'ont pu être montrés. Une première limite expliquant cette absence de résultats réside dans le faible nombre de participants (N = 24) qui a limité la puissance statistique. La durée de passation (environ une heure et demie par participant) ainsi que son critère d'inclusion (première année en psychologie) ont rendu difficile d'obtenir plus de participants.

Cette limite aurait pu être moins importante pour l'ajout de mesures complémentaires de la progression dans l'activité. En effet, notre mesure de la progression est limitée aux différences entre la position de la main et la bonne position sur la planche. Or, il serait possible d'ajouter une mesure de suivi oculaire afin de collecter l'attention visuelle lors de l'activité. Cela permettrait d'étudier les relations entre l'agentivité globale et, par exemple, les changements dans les habitudes visuelles (par ex., la séquence, la fréquence et la durée des fixations oculaires). Ces changements d'habitude pouvant servir d'indicateurs des stratégies de résolution de problème utilisées et de la compréhension des participants (Eckstein, Guerra-Carrillo, Singley, & Bunge, 2017).

Une autre limite concerne l'absence de groupe contrôle sur le sentiment d'agentivité. Comme développé dans la discussion de l'étude 3, le sentiment d'agentivité est facilité par l'interactivité permise en RV et aurait pu "uniformiser" l'agentivité des participants, rendant la mesure de l'agentivité globale moins importante dans cet apprentissage actif. Nous n'avons pas testé directement cette hypothèse, et il serait important de reproduire cette étude en RV à l'identique, mais, par exemple, avec l'expérimentateur qui contrôle la manette d'interaction, sous la direction du participant. Cela permettrait de garder l'immersion et les stratégies du participant, tout en limitant fortement son agentivité locale.

3.4.4 Limites de l'étude 4

L'étude 4 a reproduit la procédure de la précédente étude, mais en utilisant une vidéo de l'activité au lieu de faire agir directement par le participant. Cela a permis de tester l'association entre les facteurs d'agentivité globale et l'apprentissage par observation, sans agentivité locale. Les résultats ont montré que l'agentivité globale positive avait une influence positive avec l'amélioration des exercices, mais uniquement lorsque l'on utilise la vidéo montrant un profil réaliste d'apprenant, progressant de façon similaire à l'étude 3. En outre, les résultats indiquent que les participants ont ressenti plus d'apprentissages et ont adopté davantage le point de vue de l'apprenant observé avec le profil réaliste. Cependant, cette dernière étude comporte plusieurs limites.

La première, qui vaut aussi pour l'étude 3, est que nous avons ciblé une population spécifique (étudiants de première année en Psychologie) rapportant des difficultés dans une matière spécifique (statistiques). Ceci implique que les résultats ne peuvent pas être généralisés à tout type d'étudiant ni tout âge.

Qui plus est, concernant l'efficacité de l'activité d'apprentissage, nous ne savons pas si des connaissances préalables sont nécessaires. En effet, la connaissance ciblée dans cette étude (la moyenne arithmétique) est enseignée depuis la fin de l'école primaire et nous ne savons pas s'il existe des connaissances préalables spécifiques au gain d'apprentissage par l'activité. Or, les connaissances préalables sont importantes dans la façon de guider l'apprenant. De faibles connaissances vont nécessiter un guidage plus important et inversement (Kalyuga, 2013). Ainsi, l'apprentissage lors de l'activité pourrait bénéficier de guidage supplémentaire selon les connaissances préalables, potentiellement estimées avec la mesure en pré-test ou par la difficulté lors de l'activité. Par exemple, l'utilisation d'heuristiques explicites, telles que des conseils ou des suggestions (Zacharia et al., 2015), ou bien des heuristiques implicites, telles que mettre en évidence des informations importantes (par ex., la distance entre chaque cube et la manette).

Enfin, une autre limite concerne l'absence de mesure permettant de distinguer le, ou les, processus influencés par l'agentivité globale afin de permettre l'apprentissage. Nous avons fait l'hypothèse que l'agentivité pourrait être associée à une plus grande prise de perspective, augmentant l'influence de l'activité observée. Une autre hypothèse, pas nécessairement incompatible, serait que l'agentivité influence la capacité de réflexion et de construction de similarité entre l'activité et les exercices. Ainsi, des éléments de réponses pourraient être apportés en reproduisant la condition d'apprentissage par observation du profil réaliste, mais avec deux nouvelles conditions, la première montrant un point de vue à la troisième personne et non plus à la première, et la deuxième, demandant au participant de réfléchir à leurs hypothèses avant de voir la réponse avec la vidéo et ensuite de réfléchir aux raisons de leurs succès ou échecs sur les estimations.

***

Dans l'ensemble, ces travaux confirment la difficulté d'étudier le sens de l'agentivité, qui est encore une notion très englobante et demande encore de nombreux travaux pour être clairement délimité. L'agentivité permettrait d'étudier les mécanismes sous-jacents et les indices spécifiques ou partagés, qui pourraient expliquer ou prédire son influence sur l'apprentissage. Malgré ces limites, la prise en compte de l'agentivité semble belle et bien importante à considérer dans l'apprentissage et offre des perspectives nouvelles.

3.5 Mises en perspective

3.5.1 Perspectives liées à l'échelle d'agentivité globale

En ce qui concerne les perspectives des travaux de l'axe 1, c'est-à -dire l'échelle d'agentivité globale, F-SoAS, plusieurs pistes de recherches peuvent être proposées.
La première serait de continuer à étudier les effets des critères sociodémographiques (par ex., le genre, l'âge, le niveau d'étude, la catégorie d'emploi, etc.) sur les facteurs d'agentivité globale positive et négative, étant donné les effets transversaux du genre, de l'âge et de la culture (Donald et al., 2020). Des études longitudinales et corrélationnelles sur un grand échantillon, représentatif de la population française, voire francophone, permettraient d'établir des versions de l'échelle standardisée, calibrée et adaptée aux différentes populations. L'échelle pourrait ainsi permettre des études pour explorer davantage les liens entre l'agentivité globale et les mécanismes d'apprentissage dans la population générale. Une étude de la validité d'une traduction anglaise, avec un échantillon de natifs anglophones, permettrait également de renforcer nos résultats, et d'étendre la portée de l'échelle.

Notons que la littérature sur l'agentivité soutient l'idée que les critères sociodémographiques ont un effet (Valås, 2001 ; Jejeebhoy et al., 2010). À titre d'exemple, une différence faible, mais néanmoins significative a été trouvée entre les hommes et les femmes de notre étude 1. Cette différence pourrait être liée à des différences d'empathie (percevoir avec précision la vision d'une autre personne), des études montrant qu'elle est plus présente chez les femmes que chez les hommes (Schulte-Rüther, Markowitsch, Shah, Fink, & Piefke, 2008 ; Davis, 2018). De plus, les hommes sont décrits/prescrits comme agentique (pouvoir, autonomie, décisif, dominant, agressif), et les femmes comme communal (empathique, émotionnel, socialisant, dépendant) par leurs rôles de genre (D. G. Smith, Rosenstein, Nikolov, & Chaney, 2019). Ces stéréotypes et différences de genre pourraient contribuer à expliquer pourquoi les femmes se jugent moins agentives que les hommes. Il serait donc intéressant d'utiliser l'échelle au sein d'études portant sur cela.

La culture a ainsi un impact complexe sur l'intégration et la perception des causes externes dans les jugements d'attribution (par ex., entre la culture asiatique et la culture occidentale, voir Choi & Choi, 2002 ; Mezulis et al., 2004). Des études supplémentaires, portant sur des entretiens cognitifs structurés avec une analyse qualitative comparée entre les pays, devraient être intéressantes pour mieux comprendre ces différences interculturelles et permettre l'adaptation de l'échelle.

De surcroit, les personnes atteintes de troubles obsessionnels compulsifs semblent avoir un sens de l'agentivité altéré (Gentsch, Schütz-Bosbach, Endrass, & Kathmann, 2012 ; Oren, Friedmann, & Dar, 2016), tout comme les personnes atteintes de schizophrénie (Maeda et al., 2013). L'exploration de la dissociation entre le sentiment d'agentivité (un processus de bas niveau) et le jugement d'agentivité (un processus de haut niveau) dans la schizophrénie (Fletcher & Frith, 2009) sur la base d'une nouvelle mesure de l'agentivité pourrait aider à développer des interventions.

Une autre piste de recherche serait de reproduire les résultats de Oren et al. (2016) et Tapal et al. (2017), qui ont rapporté une corrélation étroite entre l'agentivité globale négative et le degré autodéclaré de symptômes obsessionnels compulsifs. Cela permettrait d'étudier une éventuelle corrélation entre les facteurs du F-SoAS et les symptômes positifs de la schizophrénie (hallucinations et délires). De façon plus générale, l'échelle pourrait permettre des études pour explorer davantage les liens entre l'agentivité globale et les symptômes de pathologie (hallucination, symptômes obsessionnels compulsifs...) dans les populations cliniques.

Une dernière piste de recherche, liée aux résultats de l'étude 4, serait de réaliser des études corrélationnelles, voire expérimentales, afin d'étudier l'hypothèse d'une plus grande capacité de prise de perspectives pour les individus ayant un fort niveau d'agentivité globale positive. En effet, dans cette étude les participants ayant une agentivité globale positive ont montré de meilleurs résultats aux exercices que les autres, après avoir observé l'activité. Cette activité étant réalisée de façon réaliste sur la vidéo et ayant suscité une plus grande prise de perspective chez les participants de cette condition réaliste. De plus, il a été suggéré que la prise de perspective spatiale évolue à partir d'un système de représentation de l'action (Frith & Frith, 1999) et il a été prouvé qu'elle est étroitement liée aux capacités cognitives (Muto, Matsushita, & Morikawa, 2017). Ajoutons que plusieurs études sur la IRMf ont déjà souligné la nécessité d'étudier l'agentivité avec la prise de perspective spatiale, car leurs activations neuronales se chevauchent partiellement (David et al., 2006).

En ce qui nous concerne, nous émettons l'hypothèse que le fait de se sentir plus agent permet de mieux se projeter dans la perspective des autres, ce qui conduirait à une meilleure intégration et à un meilleur apprentissage à partir d'observations. La prise de perspective peut être mesurée par différents test, par exemple le Spatial Orientation Test (Hegarty & Waller, 2004) dans lequel on montre aux participants un ensemble d'objets et on leur demande d'imaginer qu'ils se tiennent devant l'un de ces objets, qu'ils font face à un autre objet et qu'ils doivent dessiner une flèche pour indiquer la direction d'un troisième objet depuis cette configuration imaginaire. Étudier les corrélations entre les

résultats à ces mesures et les scores à l'échelle d'agentivité globale permettrait d'apporter des réponses quant à l'influence de l'agentivité sur l'apprentissage, possiblement par des capacités plus marquées de faire "soi" la perspective de l'autre. Il serait envisageable de proposer une version plus écologique de la mesure de prise de perspective en reproduisant l'étude 2, mais en utilisant une version immersive du test, notamment développée par Gunalp, Moossaian, et Hegarty (2019).

3.5.2 Perspectives liées à la Réalité Virtuelle

Il est également important de réfléchir à l'utilisation de la réalité virtuelle dans l'apprentissage, notamment par ses liens avec l'agentivité. Un nombre croissant de recherches permettent déjà de confirmer le potentiel de l'utilisation de la RV dans l'apprentissage (Jensen & Konradsen, 2018 ; Tilhou, Taylor, & Crompton, 2020). La RV peut être considérée comme un soutien précieux aux problèmes auxquels les enseignants et les apprenants sont confrontés. Elle permet de mettre l'apprenant au cœur de la situation et de lui faire vivre un ensemble d'expériences sensorimotrices et cognitives sur lesquelles il pourra développer son agentivité et construire des connaissances.

Une première piste concerne l'accessibilité de la réalité virtuelle (RV) et la construction d'environnements virtuels qui peuvent être configurés, facilités et réutilisés pour l'apprentissage. Un environnement immersif virtuel peut être adapté selon les compétences et connaissances préalables de l'apprenant, permettre la réversibilité des actions (par ex., revenir en arrière après une erreur), proposer une multitude de moyens de présenter et produire de l'information ou encore la possibilité d'enregistrer et d'observer ses propres actions. La RV nécessite d'être étudiée pour ses intérêts et capacités spécifiques, mais également au regard de la méthode d'apprentissage utilisée ou nécessaire. En d'autres termes, l'accent doit être mis sur l'apprentissage avec la technologie et une méthode particulière plutôt que sur l'apprentissage à partir de la technologie ou sur la technologie, sans considérer de méthode.

A cela s'ajoute le contexte de la classe dont la configuration d'apprentissage semble particulièrement prometteuse pour explorer l'utilisation de technologie comme la RV et l'activité "Hooks and Shifts", à savoir des stations d'apprentissage rotatives (Judson, 2019 ; Petrick, 2012). Les stations d'apprentissage sont des emplacements dans la salle de classe avec des activités pratiques. Chaque station présente un problème que les élèves doivent résoudre (Georgiou & Ioannou, 2020), avec des activités simples et des instructions explicites. Cette configuration présente plusieurs avantages, notamment en ce qui concerne l'utilisation de la technologie.

Premièrement, elle diminue le matériel et le temps nécessaires à la mise en place, par exemple, un ou deux dispositifs de RV seraient suffisants pour un groupe-classe. Deuxièmement, elle crée des opportunités pour une population d'étudiants diversifiée d'avoir une certaine responsabilité dans leur environnement d'apprentissage. Cela donne plus d'occasions à l'enseignant de guider les étudiants dans la construction de la connaissance, en permettant aux étudiants d'expérimenter différents points de vue, différentes possibilités, et ainsi, d'être capable de créer des similitudes entre les situations et de favoriser

l'abstraction. En suivant les activités explorées dans l'étude actuelle, nous proposons un exemple de stations d'apprentissage pour introduire des connaissances abstraites, telles que la moyenne arithmétique, au début de la licence, dans les travaux pratiques et les travaux dirigés. La première station (1) expliquerait la connaissance à apprendre, à travers des définitions et les étudiants feraient des exercices. La deuxième station (2) serait l'activité "Crochets et décalages" (comme l'expérience 1), qui serait parallèle à la troisième station (3), observant l'étudiant réalisant l'activité (comme l'expérience 2). Enfin, la dernière station (4) serait une session de débriefing. Les études futures pourraient être particulièrement intéressantes pour confirmer l'idée proposée et explorer la configuration optimale de l'ordre (par ex., observer avant de s'engager dans une expérience directe pour améliorer le gain d'apprentissage - Hoover, Giambatista, & Belkin, 2012). En outre, cette méthode pourrait être utilisée dans d'autres contextes, comme la formation professionnelle, ou sur des populations ayant un accès difficile aux situations d'apprentissage. Comme l'illustre une étude de Boucheix (2003), qui a utilisé une méthode d'apprentissage similaire auprès de grutiers professionnels étant analphabètes.

Ces perspectives impliqueraient également de répondre à de nombreuses questions telles que : quelle méthode choisir pour un public donné ? Quelle est la méthode optimale ? comment intégrer plusieurs méthodes sous une forme cohérente ? Quelle nouvelle pédagogie développée pour une utilisation significative de la technologie ? Comment adapter les capacités ou la méthode aux caractéristiques dispositionnelles de l'apprenant ? Quel degré de liberté permettre par rapport à l'outil ou la méthode ? Quels impacts va avoir cette liberté sur l'agentivité et l'apprentissage ? De ce point de vue, le modèle CAMIL (Makransky & Petersen, 2021), portant sur l'apprentissage avec la RV, représente des bases théoriques et pratiques intéressantes pour réfléchir à ces questions.

En plus de ce modèle, il nous semblerait pertinent de questionner plus l'influence de facteurs dispositionnels de l'apprenant. Par exemple, l'agentivité globale, malgré une absence de résultat direct dans l'étude 3, indique des différences dans le traitement des conséquences de ses actions et ce qui pourrait avoir des conséquences sur le sentiment de présence dans l'environnement virtuel.

Une autre piste concerne la modification de l'agentivité au travers des modifications possibles sur l'immersion et l'interaction de l'utilisateur. La RV va permettre de modifier les points de vue (par ex., voir ses mouvements à la première ou la troisième personne), de manipuler les conséquences des actions (par ex., afficher une information au contact de la main sur un objet ; inverser la latéralité des mouvements). Autant d'ancrages sensorimoteurs sur lesquels la cognition va pouvoir réagir et s'adapter. Ces possibilités sont particulièrement intéressantes, car il a été démontré que la modification du retour senso-

riel dans la RV renforce le sens de l'agentivité (Aoyagi et al., 2021).

Il est, par exemple, possible de susciter un sentiment d'agentivité sur des mouvements ayant subi des modifications (Azmandian, Hancock, Benko, Ofek, & Wilson, 2016) et même sur un discours non prononcé (Banakou & Slater, 2014). En outre, il est possible de modifier les mouvements du bras par des retours visuels modifiés, sans que le participant n'en ait conscience (Bourdin, Martini, & Sanchez-Vives, 2019). De façon remarquable, les participants vont pouvoir accepter naturellement des membres surnuméraires (Won, Bailenson, Lee, & Lanier, 2015).

Par exemple, les sujets peuvent contrôler les queues de leurs avatars (Steptoe, Steed, & Slater, 2013) ou une main possédant six doigts (Hoyet, Argelaguet, Nicole, & Lécuyer, 2016). Ajoutons qu'il est aussi possible d'avoir un sens de l'agentivité pour des mouvements corporels, pourtant contrôlés par deux participants (Hagiwara, Sugimoto, Inami, & Kitazaki, 2019).

Cependant, des modifications suffisamment radicales entre les retours d'actions en RV et les actions initiées par le participant peuvent rompre le sens de l'agentivité (par ex., voir Padrao, Gonzalez-Franco, Sanchez-Vives, Slater, & Rodriguez-Fornells, 2016). Il se pose de nouvelles questions sur l'impact que de telles pratiques pourraient permettre ou engendrer sur l'agentivité globale et les croyances sur nos potentiels d'action. Cette agentivité modifiée a-t-elle un impact hors de l'environnement virtuel ? Les personnes ayant des dispositions différentes à l'agentivité globale ont-elles des sensibilités différentes à ces manipulations ? Un usage répété peut-il amener à modifier sa perception globale comme agent ?

La RV a également un intérêt particulier pour étudier l'agentivité et l'apprentissage tant d'un point de vue expérimental que pratique. Elle aura un rôle dans les pratiques éducatives futures (par ex., l'apprentissage par le jeu sérieux, la classe inversée, les instructions par les pairs, etc.) et en particulier dans les nécessités actuelles et futures de l'enseignement à distance. Tandis qu'aujourd'hui les universités offrent aux apprenants à distance la possibilité de suivre des cours en ligne, demain il sera possible de proposer une immersion si ce n'est total, au moins authentique, des étudiants dans l'expérience universitaire, en leur permettant de se sentir présents dans une discussion ou un cours grâce à la réalité virtuelle. Les cours pourraient également être enregistrés pour une utilisation ultérieure.

Pour toutes ces raisons, les questions relatives à notre capacité de se sentir agent dans cet ensemble de situations d'apprentissage, médiatisé par une technologie immersive, ne cesseront de se poser.

Dans l'ensemble, la réalité virtuelle reste encore difficile à appréhender dans son ensemble et ses perspectives, nous sommes néanmoins confiants que les futures études et applications permettront d'exploiter au mieux ses capacités uniques d'immersion et d'interaction sensorimotrice. Nous pensons d'un côté au coût et à l'accessibilité chaque jour davantage abordables grâce aux investissements massifs de l'industrie technologique, par exemple, le dispositif Oculus Quest 2 est sorti en 2019 et coûte maintenant environ 300 euros, sans fil et aucun ordinateur n'est nécessaire. De plus, cela est accompagné de logiciels de création d'environnement virtuels gratuits (par ex., Unity et Unreal Engine), supportés par de larges communautés proposant des tutoriels et des éléments pré-programmé, voire pouvant être programmés uniquement par interfaces, sans lignes de codes. Ces considérations techniques devraient faciliter ainsi l'investissement et le développement d'activités de recherches (Parsons, Gaggioli, & Riva, 2017) et de pédagogie (Martín-Gutiérrez, Mora, Añorbe-Díaz, & González-Marrero, 2017) en réalité virtuelle.

3.5.3 Perspectives liées aux liens entre agentivité et apprentissage

Deux approches de l'apprentissage nous semblent importante à présenter, car elles mettent l'individu et son autonomie au cœur du dispositif. La première, concernant le milieu éducatif, est la méthode Montessori. Proche du constructivisme, elle met l'accent sur les possibilités de mouvement et d'interaction des élèves dans un environnement structuré qui soutient et encourage la curiosité naturelle des enfants (Montessori, Hunt, & Valsiner, 2017). L'environnement revêt une importance centrale, devant être soigneusement disposé, pour faciliter à la fois les leçons académiques et les exercices de la vie quotidienne, tels que les compétences sociales, le souci de la santé et de l'hygiène et l'autodiscipline (Hedeen, 2005). Dans cet environnement, des enseignants, spécialement formés, accompagnent l'enfant en prenant en compte des sensibilités propres selon un contenu d'apprentissage particulier. Un aspect crucial de la pédagogie Montessori est le travail indépendant. L'enfant choisit ce qu'il veut faire ainsi que la durée et les personnes avec lesquelles il veut travailler. Le processus éducatif est donc basé sur "l'auto-direction". Le principe étant de considérer que l'enfant est capable de décider librement et de lui laisser l'opportunité de construire sa propre discipline. Cette méthode pourrait être une manière de faciliter l'agentivité des apprenants, tant de façon locale que globale, tout en étant associée fondamentalement à une approche constructiviste de la connaissance, fondée sur les interactions sensorimotrices. La pédagogie Montessori est multifactorielle et il est difficile

de savoir quels éléments exactement ont un rôle clef (Marshall, 2017). Dans ce contexte, la notion d'agentivité pourrait être un apport pour mesurer et comprendre les bénéfices ou spécificités de cette pédagogie.

La seconde approche s'inscrit dans le milieu professionnel et est développée par la société Sensei. Également proche du constructivisme, elle place comme essentiel de favoriser les expériences sensorimotrices au centre de tout apprentissage. Son objectif est de permettre une acquisition durable de nouvelles connaissances sur lesquelles il va être possible d'orienter les futurs comportements et faciliter l'adaptation d'une personne à l'ensemble des situations associées. Pour cela, elle apporte des dispositifs d'accompagnement individuels et collectifs auprès d'entreprises afin d'aider les employés à développer des connaissances et des comportements dans une multitude de domaines (par ex., la gestion du stress, la communication, la prise de décision, la créativité, etc.). Un suivi pédagogique est apporté, s'appuyant sur un large panel d'expériences sensorimotrices utilisées comme autant de métaphores analogiques servant à faciliter l'abstraction des connaissances désirées. Par exemple, il est possible de guider un individu à construire, ou reconstruire, ses connaissances autour de la communication non verbale par une activité centrée sur l'équi-coaching. Cette pratique va nécessiter d'amener un cheval à suivre des indications. Le cheval réagissant facilement et de façon visible aux émotions, cette activité peut permettre, au travers d'accompagnement et de débriefing, d'apprendre à mieux communiquer ses intentions sans projeter d'anxiété. Par son approche, l'entreprise Sensei guide des individus afin de stimuler les prises de conscience et le développement de réflexion autour de cette connaissance. À partir d'un travail de sélection et d'adaptation des activités selon les besoins et envies de l'individu, elles les accompagnent au travers des activités et de sessions de débriefing. Ces principes de formations sont proches de ceux développés dans nos travaux de thèse, à savoir une approche constructiviste et une méthodologie d'apprentissage expérientiel afin de faciliter le transfert de ses apprentissages à diverses situations, personnelles ou professionnelles.

Nous pensons que ces approches représentent des perspectives particulièrement pertinentes pour mettre en avant l'apprenant comme un agent de son apprentissage et pourraient favoriser des changements de l'agentivité globale. En effet, les changements au niveau de l'état des pensées, des sentiments et des comportements qui sont maintenus pendant de longues périodes peuvent éventuellement se transformer en changements au niveau des traits individuels (Magidson, Roberts, Collado-Rodriguez, & Lejuez, 2014). Par exemple, les personnes dont l'emploi exige qu'elles se comportent de manière plus consciencieuse pendant une période suffisamment longue auront finalement tendance à expérimenter des augmentations stables de leurs conscienciosité (Hudson, 2021).

Dans ce contexte, la prise en compte de l'agentivité pourrait être un apport pour mesurer et comprendre les bénéfices ou spécificités de ces approches. Il pourrait également permettre d'adapter l'accompagnement proposé selon la disposition agentive de l'individu. Par exemple, dans un cadre d'activité de groupe où seule une personne réalise une activité directe tandis que les autres observent, il pourrait être bénéfique de répartir les rôles selon l'agentivité globale.

3.6 Conclusion Générale

En conclusion, les présents travaux mettent en lumière des orientations sur un sujet qui a reçu très peu d'attention, l'influence du sens de l'agentivité sur le processus d'apprentissage. La place du sens de l'agentivité, centrale à la conscience et à l'attribution causale, devrait être prise en compte dans l'étude de l'apprentissage.

Le point de vue que l'on dégage de ces travaux, est que l'agentivité va servir à faciliter l'apprentissage. Il nous semble important de prendre en compte l'agentivité, et notamment avec l'échelle proposée, car c'est une porte vers de nombreuses notions et mécanismes qui vont sous-tendre notre rapport personnel à l'action.

Toutefois, nous qualifierons le rôle de l'agentivité au sein du processus d'apprentissage comme complexe, car il reste difficile à mesurer et synthétise beaucoup de facteurs différents, agissant à plusieurs niveaux. A priori, l'apprentissage par action directe pourrait engendrer une agentivité locale suffisante pour aider l'apprentissage, malgré les différences individuelles. Notons que le trait dispositionnel d'agentivité, quant à lui, jouerait un rôle lors d'apprentissages impliquant une action indirecte par observation lorsqu'une agentivité locale n'est pas possible, ni souhaitable. Le sens de l'agentivité, à travers son influence, tant sur l'intégration sensorimotrice que sur des croyances plus générales, aurait un rôle sur l'apprentissage au travers des mécanismes de prise de perspective et d'auto-réflexion.

Nous espérons que les présents travaux de thèse stimuleront la curiosité et les recherches futures, sur la compréhension de cette relation entre le sens de l'agentivité et l'apprentissage.

Merci de votre lecture.

Références

Aarts, H., Custers, R., et Wegner, D. M. (2005). On the inference of personal authorship : Enhancing experienced agency by priming effect information. *Consciousness and cognition*, *14*(3), 439–458.

Abrahamson, D., Trninic, D., Gutiérrez, J. F., Huth, J., et Lee, R. G. (2011). Hooks and shifts : a dialectical study of mediated discovery. *Technology, Knowledge and Learning*, *16*(1), 55–85.

Ackermann, E., et al. (1996). *Constructionism in practice : Designing, thinking, and learning in a digital world*. Routledge.

Ahn, W.-k., et Bailenson, J. (1996). Causal attribution as a search for underlying mechanisms : An explanation of the conjunction fallacy and the discounting principle. *Cognitive psychology*, *31*(1), 82–123.

Alavi, M., et Leidner, D. E. (2001). Knowledge management and knowledge management systems : Conceptual foundations and research issues. *MIS quarterly*, 107–136.

Alfieri, L., Brooks, P. J., Aldrich, N. J., et Tenenbaum, H. R. (2011). Does discovery-based instruction enhance learning ? *Journal of educational psychology*, *103*(1), 1.

Alhalabi, W. (2016). Virtual reality systems enhance students' achievements in engineering education. *Behaviour & Information Technology*, *35*(11), 919–925.

Allcoat, D., et von Mühlenen, A. (2018). Learning in virtual reality : Effects on performance, emotion and engagement. *Research in Learning Technology*, *26*.

Anthes, C., García-Hernández, R. J., Wiedemann, M., et Kranzlmüller, D. (2016). State of the art of virtual reality technology. In *2016 ieee aerospace conference* (pp. 1–19).

Aoyagi, K., Wen, W., An, Q., Hamasaki, S., Yamakawa, H., Tamura, Y., ... Asama, H. (2021). Modified sensory feedback enhances the sense of agency during continuous body movements in virtual reality. *Scientific reports*, *11*(1), 1–10.

Araiza-Alba, P., Keane, T., et Kaufman, J. (2020). Are we ready for virtual reality in k-12 classrooms ?

Araujo, D., Davids, K., et Hristovski, R. (2006). The ecological dynamics of decision making in sport. *Psychology of sport and exercise*, *7*(6), 653–676.

Asai, T., Sugimori, E., et Tanno, Y. (2008). Schizotypal personality traits and prediction of one's own movements in motor control : What causes an abnormal sense of agency ? *Consciousness and Cognition*, *17*(4), 1131–1142.

Asai, T., et Tanno, Y. (2007). The relationship between the sense of self-agency and schizotypal personality traits. *Journal of Motor Behavior*, *39*(3), 162–168.

Asai, T., et Tanno, Y. (2013). Why must we attribute our own action to ourselves ? auditory hallucination like-experiences as the results both from the explicit self-other attribution and implicit regulation in speech. *Psychiatry research*, *207*(3), 179–188.

Association, A. E. R., Association, A. P., et al. (2014). National council of measurement in education-aera, apa, ncme.(2014). *Standards for educational and psychological testing*.

Azmandian, M., Hancock, M., Benko, H., Ofek, E., et Wilson, A. D. (2016). Haptic retargeting : Dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences. In *Proceedings of the 2016 chi conference on human factors in computing systems* (pp. 1968–1979).

Baceviciute, S., Terkildsen, T., et Makransky, G. (2021). Remediating learning from non-immersive to immersive media : Using eeg to investigate the effects of environmental embeddedness on reading in virtual reality. *Computers & Education*, *164*, 104122.

Bada, S. O., et Olusegun, S. (2015). Constructivism learning theory : A paradigm for teaching and learning. *Journal of Research & Method in Education*, *5*(6), 66–70.

Banakou, D., et Slater, M. (2014). Body ownership causes illusory self-attribution of speaking and influences subsequent real speaking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(49), 17678–17683.

Bandura, A. (1977). Self-efficacy : toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological review*, *84*(2), 191.

Bandura, A. (2008). An agentic perspective on positive psychology. *Positive psychology*, *1*, 167–196.

Bennett, J. A., et Saunders, C. P. (2019). A virtual tour of the cell : Impact of virtual reality on student learning and engagement in the stem classroom. *Journal of microbiology & biology education*, *20*(2), 20.

Berberian, B., Sarrazin, J.-C., Le Blaye, P., et Haggard, P. (2012). Automation technology and sense of control : a window on human agency. *PloS one*, *7*(3), e34075.

Bisra, K., Liu, Q., Nesbit, J. C., Salimi, F., et Winne, P. H. (2018). *Inducing self-explanation : A meta-analysis.* Springer.

Blakemore, S.-J., et Frith, C. (2003). Self-awareness and action. *Current opinion in neurobiology*, *13*(2), 219–224.

Blakemore, S.-J., Frith, C. D., et Wolpert, D. M. (1999). Spatio-temporal prediction modulates the perception of self-produced stimuli. *Journal of cognitive neuroscience*, *11*(5), 551–559.

Blakemore, S.-J., Wolpert, D. M., et Frith, C. D. (1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nature neuroscience*, *1*(7), 635–640.

Blakemore, S.-J., Wolpert, D. M., et Frith, C. D. (2002). Abnormalities in the awareness of action. *Trends in cognitive sciences*, *6*(6), 237–242.

Bollen, K. A. (1989). *Structural equations with latent variables* (Vol. 210). John Wiley & Sons.

Boucheix, J.-M. (2003). Simulation et compréhension de documents techniques : le cas de la formation des grutiers. *Le travail humain*, *66*(3), 253–282.

Bourdin, P., Martini, M., et Sanchez-Vives, M. V. (2019). Altered visual feedback from an embodied avatar unconsciously influences movement amplitude and muscle activity. *Scientific reports*, *9*(1), 1–9.

Bower, M. (2019). Technology-mediated learning theory. *British Journal of Educational Technology*, *50*(3), 1035–1048.

Bown, J., White, E., et Boopalan, A. (2017). Looking for the ultimate display : A brief history of virtual reality. In *Boundaries of self and reality online* (pp. 239–259). Elsevier.

Briglia, J., Servajean, P., Michalland, A.-H., Brunel, L., et Brouillet, D. (2018). Modeling an enactivist multiple-trace memory. athena : A fractal model of human memory. *Journal of Mathematical Psychology*, *82*, 97–110.

Brown, T. A. (2015). *Confirmatory factor analysis for applied research*. Guilford publications.

Brunel, L., Camus, T., Rey, A., et Versace, R. (2017). *De l'incarnation à l'émergence : apports de la cognition incarnée à l'étude du rôle des représentations mentales.* Université Grenoble-Alpes.

Brunel, L., Carvalho, P. F., et Goldstone, R. L. (2015). It does belong together : Cross-modal correspondences influence cross-modal integration during perceptual learning. *Frontiers in psychology*, *6*, 358.

Brunel, L., Goldstone, R. L., Vallet, G., Riou, B., et Versace, R. (2013). When seeing a dog activates the bark. *Experimental Psychology*.

Bruner, J. S. (1961). The act of discovery. *Harvard educational review*.

Bruner, J. S., et al. (1966). *Toward a theory of instruction* (Vol. 59). Harvard University Press.

Burke, C. J., Tobler, P. N., Baddeley, M., et Schultz, W. (2010). Neural mechanisms of observational learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(32), 14431–14436.

Bussi, M. B., et Mariotti, M. A. (2008). Semiotic mediation in the mathematics classroom : Artifacts and signs after a vygotskian perspective. *Handbook of international research in mathematics education*, *746*.

Byrne, B. M., et Watkins, D. (2003). The issue of measurement invariance revisited. *Journal of cross-cultural psychology*, *34*(2), 155–175.

Camus, T., Brouillet, D., et Brunel, L. (2016). Assessing the functional role of motor response during the integration process. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *42*(11), 1693.

Camus, T., Hommel, B., Brunel, L., et Brouillet, T. (2018). From anticipation to integration : the role of integrated action-effects in building sensorimotor contingencies. *Psychonomic bulletin & review*, *25*(3), 1059–1065.

Carlson, K. D., et Herdman, A. O. (2012). Understanding the impact of convergent

validity on research results. *Organizational Research Methods*, *15*(1), 17–32.

Caspar, E. A., Christensen, J. F., Cleeremans, A., et Haggard, P. (2016). Coercion changes the sense of agency in the human brain. *Current biology*, *26*(5), 585–592.

Chambon, V., Moore, J. W., et Haggard, P. (2015). Tms stimulation over the inferior parietal cortex disrupts prospective sense of agency. *Brain Structure and Function*, *220*(6), 3627–3639.

Chatman, L. (2014). *From choosing to responsibility-the impact of the sense of control on memory*. Columbia University.

Chatman, L., et Sparrow, B. (2011). The feeling of doing across levels of analysis-the effects of perceived control on learning. *Horizons of Psychology*, *20*(3), 73–91.

Chiesa, M. (1994). *Radical behaviorism : The philosophy and the science.* Authors Cooperative.

Chittaro, L., et Buttussi, F. (2015). Assessing knowledge retention of an immersive serious game vs. a traditional education method in aviation safety. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, *21*(4), 529–538.

Choi, I., et Choi, Y. (2002). Culture and self-concept flexibility. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *28*(11), 1508–1517.

Cloutier, J., et Macrae, C. N. (2008). The feeling of choosing : Self-involvement and the cognitive status of things past. *Consciousness and cognition*, *17*(1), 125–135.

Cochran, W. G. (1952). The $\chi 2$ test of goodness of fit. *The Annals of mathematical statistics*, 315–345.

Cohen, G. L., Garcia, J., Purdie-Vaughns, V., Apfel, N., et Brzustoski, P. (2009). Recursive processes in self-affirmation : Intervening to close the minority achievement gap. *science*, *324*(5925), 400–403.

Commission, I. T., et al. (2014). Itc guidelines on quality control in scoring, test analysis, and reporting of test scores. *International Journal of Testing*, *14*(3), 195–217.

Corveleyn, X., López-Moliner, J., et Coello, Y. (2012). Motor action reduces temporal asynchrony between perceived visual changes. *Journal of vision*, *12*(11), 20–20.

Damasio, A. R. (1994). Descartes' error and the future of human life. *Scientific American*, *271*(4), 144–144.

Da Silva, F., Camus, T., Brouillet, D., Jimenez, M., Viglieno, E., et Brunel, L. (2021). Is a letterbox always a letterbox ? the role of affordances in guiding perceptual categorization. *Psychological research*, *85*(4), 1673–1684.

David, N., Bewernick, B. H., Cohen, M. X., Newen, A., Lux, S., Fink, G. R., ... Vogeley, K. (2006). Neural representations of self versus other : visual-spatial perspective taking and agency in a virtual ball-tossing game. *Journal of cognitive neuroscience*, *18*(6), 898–910.

David, N., Newen, A., et Vogeley, K. (2008). The "sense of agency" and its underlying cognitive and neural mechanisms. *Consciousness and cognition*, *17*(2), 523–534.

David, N., Stenzel, A., Schneider, T., et Engel, A. (2011). The feeling of agency : empirical indicators for a pre-reflective level of action awareness. *Frontiers in psychology*, *2*, 149.

Davis, M. H. (2018). *Empathy : A social psychological approach*. Routledge.

Dede, C., Salzman, M. C., et Loftin, R. B. (1996). Sciencespace : Virtual realities for learning complex and abstract scientific concepts. In *Proceedings of the ieee 1996 virtual reality annual international symposium* (pp. 246–252).

Dede, C., Salzman, M. C., Loftin, R. B., et Sprague, D. (1999). Multisensory immersion as a modeling environment for learning complex scientific concepts. In *Modeling and simulation in science and mathematics education* (pp. 282–319). Springer.

DeFanti, T. A., Dawe, G., Sandin, D. J., Schulze, J. P., Otto, P., Girado, J., ... Rao, R. (2009). The starcave, a third-generation cave and virtual reality optiportal. *Future Generation Computer Systems*, *25*(2), 169–178.

De Houwer, J., Barnes-Holmes, D., et Moors, A. (2013). What is learning ? on the nature and merits of a functional definition of learning. *Psychonomic bulletin & review*, *20*(4), 631–642.

Denis, M., Engelkamp, J., et Mohr, G. (1991). Memory of imagined actions : Imagining oneself or another person. *Psychological Research*, *53*(3), 246–250.

Desantis, A., Roussel, C., et Waszak, F. (2011). On the influence of causal beliefs on the feeling of agency. *Consciousness and Cognition*, *20*(4), 1211–1220.

Desantis, A., Weiss, C., Schütz-Bosbach, S., et Waszak, F. (2012). Believing and perceiving : Authorship belief modulates sensory attenuation. *PLoS One*, *7*(5), e37959.

Dewey, J. A. (1986). Experience and education. In *The educational forum* (Vol. 50, pp. 241–252).

Dewey, J. A., et Knoblich, G. (2014). Do implicit and explicit measures of the sense of agency measure the same thing ? *PloS one*, *9*(10), e110118.

Dinh, H. Q., Walker, N., Hodges, L. F., Song, C., et Kobayashi, A. (1999). Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments. In *Proceedings ieee virtual reality (cat. no. 99cb36316)* (pp. 222–228).

Donald, A., Koolwal, G., Annan, J., Falb, K., et Goldstein, M. (2020). Measuring women's agency. *Feminist Economics*, *26*(3), 200–226.

Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis : untersuchungen zur experimentellen psychologie*. Duncker & Humblot.

Ebert, J. P., et Wegner, D. M. (2010). Time warp : Authorship shapes the perceived timing of actions and events. *Consciousness and cognition*, *19*(1), 481–489.

Eckstein, M. K., Guerra-Carrillo, B., Singley, A. T. M., et Bunge, S. A. (2017). Beyond eye gaze : What else can eyetracking reveal about cognition and cognitive development ? *Developmental cognitive neuroscience*, *25*, 69–91.

Eitam, B., et Higgins, E. T. (2010). Motivation in mental accessibility : Relevance

of a representation (roar) as a new framework. *Social and personality psychology compass*, *4*(10), 951–967.

Eitam, B., Kennedy, P. M., et Higgins, E. T. (2013). Motivation from control. *Experimental brain research*, *229*(3), 475–484.

Elsner, B., et Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, *27*(1), 229.

Emmelkamp, P. M. (2005). Technological innovations in clinical assessment and psychotherapy. *Psychotherapy and psychosomatics*, *74*(6), 336–343.

Engbert, K., Wohlschläger, A., Thomas, R., et Haggard, P. (2007). Agency, subjective time, and other minds. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *33*(6), 1261.

Engelkamp, J. (1998). *Memory for actions.* Psychology Press/Taylor & Francis (UK).

Engelkamp, J. (2001). Action memory. *Memory for action : A distinct form of episodic memory ?*, 49.

Engelkamp, J., Zimmer, H. D., Mohr, G., et Sellen, O. (1994). Memory of self-performed tasks : Self-performing during recognition. *Memory & Cognition*, *22*(1), 34–39.

Ernst, M. O., et Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, *415*(6870), 429–433.

Ernst, M. O., et Bülthoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in cognitive sciences*, *8*(4), 162–169.

Fagard, J., Esseily, R., Jacquey, L., O'regan, K., et Somogyi, E. (2018). Fetal origin of sensorimotor behavior. *Frontiers in neurorobotics*, *12*, 23.

Fajen, B. R., Riley, M. A., et Turvey, M. T. (2008). Information, affordances, and the control of action in sport. *international Journal of sport psychology*, *40*(1), 79–107.

Farrer, C., Bouchereau, M., Jeannerod, M., et Franck, N. (2008). Effect of distorted visual feedback on the sense of agency. *Behavioural neurology*, *19*(1, 2), 53–57.

Farrer, C., Franck, N., Georgieff, N., Frith, C. D., Decety, J., et Jeannerod, M. (2003). Modulating the experience of agency : a positron emission tomography study. *Neuroimage*, *18*(2), 324–333.

Field, A. (2009). Discovering statistics using spss third edition.

Fletcher, P. C., et Frith, C. D. (2009). Perceiving is believing : a bayesian approach to explaining the positive symptoms of schizophrenia. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(1), 48–58.

Fodor, J. A. (1981). The mind-body problem. *Scientific american*, *244*(1), 114–123.

Fodor, J. A., et Pylyshyn, Z. W. (1988). Connectionism and cognitive architecture : A critical analysis. *Cognition*, *28*(1-2), 3–71.

Fornell, C., et Larcker, D. F. (1981). *Structural equation models with unobservable variables and measurement error : Algebra and statistics.* Sage Publications Sage CA : Los Angeles, CA.

Fosnot, C. T. (2013). *Constructivism : Theory, perspectives, and practice*. Teachers College Press.

Fosnot, C. T., et Perry, R. S. (1996). Constructivism : A psychological theory of learning. *Constructivism : Theory, perspectives, and practice*, *2*(1), 8–33.

Fourneret, P., et Jeannerod, M. (1998). Limited conscious monitoring of motor performance in normal subjects. *Neuropsychologia*, *36*(11), 1133–1140.

Franck, N., Farrer, C., Georgieff, N., Marie-Cardine, M., Daléry, J., d'Amato, T., et Jeannerod, M. (2001). Defective recognition of one's own actions in patients with schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, *158*(3), 454–459.

Freina, L., et Ott, M. (2015). A literature review on immersive virtual reality in education : state of the art and perspectives. In *The international scientific conference elearning and software for education* (Vol. 1, pp. 10–1007).

Frith, C. D., Blakemore, S.-J., et Wolpert, D. M. (2000). Abnormalities in the awareness and control of action. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, *355*(1404), 1771–1788.

Frith, C. D., et Frith, U. (1999). Interacting minds–a biological basis. *Science*, *286*(5445), 1692–1695.

Fromm, J., Radianti, J., Wehking, C., Stieglitz, S., Majchrzak, T. A., et vom Brocke, J. (2021). More than experience ?-on the unique opportunities of virtual reality to afford a holistic experiential learning cycle. *The Internet and Higher Education*, *50*, 100804.

Fuchs, P. (2017). *Virtual reality headsets-a theoretical and pragmatic approach*. CRC Press.

Gal, I. (2002). Adults' statistical literacy : Meanings, components, responsibilities. *International statistical review*, *70*(1), 1–25.

Gallagher, S. (2007). The natural philosophy of agency. *Philosophy Compass*, *2*(2), 347–357.

Gallagher, S. (2012). Multiple aspects in the sense of agency. *New ideas in psychology*, *30*(1), 15–31.

Gallese, V., et Lakoff, G. (2005). The brain's concepts : The role of the sensory-motor system in conceptual knowledge. *Cognitive neuropsychology*, *22*(3-4), 455–479.

Gana, K., et Broc, G. (2019). *Structural equation modeling with lavaan*. John Wiley & Sons.

Garfield, J. B., Ben-Zvi, D., Chance, B., Medina, E., Roseth, C., et Zieffler, A. (2008). *Developing students' statistical reasoning : Connecting research and teaching practice* (N° Sirsi) i9781402083822). Springer.

Gawronski, B., LeBel, E. P., et Peters, K. R. (2007). What do implicit measures tell us ? : Scrutinizing the validity of three common assumptions. *Perspectives on psychological science*, *2*(2), 181–193.

Genschow, O., Rigoni, D., et Brass, M. (2017). Belief in free will affects causal attributions when judging others' behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(38), 10071–10076.

Gentsch, A., Schütz-Bosbach, S., Endrass, T., et Kathmann, N. (2012). Dysfunctional forward model mechanisms and aberrant sense of agency in obsessive-compulsive disorder. *Biological psychiatry*, *71*(7), 652–659.

Georgiou, Y., et Ioannou, A. (2020). A co-design approach for the development and classroom integration of embodied learning apps. In *International conference on human-computer interaction* (pp. 217–229).

Gibson, J. (1979). The ecological approach to visual perception boston : Houghton mifling, c1979.

Gillespie, A. (2007). The social basis of self-reflection.

Ginsburg, C. (2010). *The intelligence of moving bodies : A somatic view of life and its consequences*. AWAREing Press.

Goldstone, R. L., Landy, D., et Son, J. Y. (2008). A well grounded education : The role of perception in science and mathematics. *Symbols, embodiment, and meaning*, 327–355.

Goldstone, R. L., Landy, D. H., et Son, J. Y. (2010). The education of perception. *Topics in Cognitive Science*, *2*(2), 265–284.

Gorini, A., Capideville, C. S., De Leo, G., Mantovani, F., et Riva, G. (2011). The role of immersion and narrative in mediated presence : the virtual hospital experience. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, *14*(3), 99–105.

Guadagno, R. E., Blascovich, J., Bailenson, J. N., et McCall, C. (2007). Virtual humans and persuasion : The effects of agency and behavioral realism. *Media Psychology*, *10*(1), 1–22.

Gudmundsson, E. (2009). Guidelines for translating and adapting psychological instruments. *Nordic Psychology*, *61*(2), 29–45.

Gunalp, P., Moossaian, T., et Hegarty, M. (2019). Spatial perspective taking : Effects of social, directional, and interactive cues. *Memory & cognition*, *47*(5), 1031–1043.

Gunn, T., Jones, L., Bridge, P., Rowntree, P., et Nissen, L. (2018). The use of virtual reality simulation to improve technical skill in the undergraduate medical imaging student. *Interactive Learning Environments*, *26*(5), 613–620.

Haarmeier, T., Bunjes, F., Lindner, A., Berret, E., et Thier, P. (2001). Optimizing visual motion perception during eye movements. *Neuron*, *32*(3), 527–535.

Haering, C., et Kiesel, A. (2012). Mine is earlier than yours : Causal beliefs influence the perceived time of action effects. *Frontiers in psychology*, *3*, 393.

Haering, C., et Kiesel, A. (2014). Intentional binding is independent of the validity of the action effect's identity. *Acta Psychologica*, *152*, 109–119.

Haggard, P. (2005). Conscious intention and motor cognition. *Trends in cognitive sciences*,

9(6), 290–295.

Haggard, P. (2017). Sense of agency in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *18*(4), 196–207.

Haggard, P., et Chambon, V. (2012). Sense of agency. *Current Biology*, *22*(10), R390–R392.

Haggard, P., Clark, S., et Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *Nature neuroscience*, *5*(4), 382–385.

Hagiwara, T., Sugimoto, M., Inami, M., et Kitazaki, M. (2019). Shared body by action integration of two persons : Body ownership, sense of agency and task performance. In *2019 ieee conference on virtual reality and 3d user interfaces (vr)* (pp. 954–955).

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., et Tatham, R. (2006). *Multivariate data analysis . uppersaddle river.* NJ : Pearson Prentice Hall.

Hammerschlag, D., et Lake, M. (2014). The effect of testosterone on the sense of agency.

Hedeen, T. (2005). Coercion and self-determination in court-connected mediation : All mediations are voluntary, but some are more voluntary than others. *Justice System Journal*, *26*(3), 273–291.

Hegarty, M., et Waller, D. (2004). A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence*, *32*(2), 175–191.

Heilig, M. (1962). Us patent# 3,050,870. *Sensorama Simulator*.

Hintzman, D. L. (1986). " schema abstraction" in a multiple-trace memory model. *Psychological review*, *93*(4), 411.

Hintzman, D. L. (1988). Judgments of frequency and recognition memory in a multiple-trace memory model. *Psychological review*, *95*(4), 528.

Hodgson, E., Bachmann, E. R., Vincent, D., Zmuda, M., Waller, D., et Calusdian, J. (2015). Weavr : a self-contained and wearable immersive virtual environment simulation system. *Behavior research methods*, *47*(1), 296–307.

Hommel, B. (1996). The cognitive representation of action : Automatic integration of perceived action effects. *Psychological research*, *59*(3), 176–186.

Hommel, B. (2009). Action control according to tec (theory of event coding). *Psychological Research PRPF*, *73*(4), 512–526.

Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., et Prinz, W. (2001). The theory of event coding (tec) : A framework for perception and action planning. *Behavioral and brain sciences*, *24*(5), 849–878.

Hon, N., et Yeo, N. (2021). Having a sense of agency can improve memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1–7.

Hoover, J. D., Giambatista, R. C., et Belkin, L. Y. (2012). Eyes on, hands on : Vicarious observational learning as an enhancement of direct experience. *Academy of Management Learning & Education*, *11*(4), 591–608.

Horn, J. L. (1965). A rationale and test for the number of factors in factor analysis.

Psychometrika, *30*(2), 179–185.

Hoyet, L., Argelaguet, F., Nicole, C., et Lécuyer, A. (2016). "wow ! i have six fingers !" : Would you accept structural changes of your hand in vr ? *Frontiers in Robotics and AI*, *3*, 27.

Hu, L.-t., et Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis : Conventional criteria versus new alternatives. *Structural equation modeling : a multidisciplinary journal*, *6*(1), 1–55.

Hudson, N. W. (2021). Dynamics and processes in personality change interventions. In *The handbook of personality dynamics and processes* (pp. 1273–1295). Elsevier.

Hughes, G., Desantis, A., et Waszak, F. (2013). Mechanisms of intentional binding and sensory attenuation : the role of temporal prediction, temporal control, identity prediction, and motor prediction. *Psychological bulletin*, *139*(1), 133.

Hurault, J.-C., Broc, G., Crône, L., Tedesco, A., et Brunel, L. (2020). Measuring the sense of agency : A french adaptation and validation of the sense of agency scale (f-soas). *Frontiers in Psychology*, *11*, 2650.

Hurley, S. (2001). Perception and action : Alternative views. *Synthese*, *129*(1), 3–40.

Imaizumi, S., et Tanno, Y. (2019). Intentional binding coincides with explicit sense of agency. *Consciousness and Cognition*, *67*, 1–15.

Iyengar, S. S., et Lepper, M. R. (1999). Rethinking the value of choice : a cultural perspective on intrinsic motivation. *Journal of personality and social psychology*, *76*(3), 349.

James, W. (1890). The perception of reality. *Principles of psychology*, *2*, 283–324.

Jejeebhoy, S., Acharya, R., Alexander, M., Garda, L., et Kanade, S. (2010). Measuring agency among unmarried young women and men. *Economic and Political Weekly*, 56–64.

Jensen, L., et Konradsen, F. (2018). A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*, *23*(4), 1515–1529.

Johansson, P., Hall, L., Sikström, S., et Olsson, A. (2005). Failure to detect mismatches between intention and outcome in a simple decision task. *Science*, *310*(5745), 116–119.

Johnson-Glenberg, M. C. (2019). The necessary nine : Design principles for embodied vr and active stem education. In *Learning in a digital world* (pp. 83–112). Springer.

Judson, E. (2019). Learning stations in college classrooms. *College Teaching*, *67*(4), 250–251.

Kalina, C., et Powell, K. (2009). Cognitive and social constructivism : Developing tools for an effective classroom. *Education*, *130*(2), 241–250.

Kalyuga, S. (2013). Effects of learner prior knowledge and working memory limitations on multimedia learning. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *83*, 25–29.

Karaseitanidis, I., Amditis, A., Patel, H., Sharples, S., Bekiaris, E., Bullinger, A., et Tromp, J. (2006). Evaluation of virtual reality products and applications from individual, organizational and societal perspectives—the "view" case study. *International Journal of Human-Computer Studies*, *64*(3), 251–266.

Karsh, N., et Eitam, B. (2015). I control therefore i do : Judgments of agency influence action selection. *Cognition*, *138*, 122–131.

Karsh, N., Goldstein, O., et Eitam, B. (2018). Evidence for pain attenuation by the motor system-based judgment of agency. *Consciousness and cognition*, *57*, 134–146.

Kawabe, T., Roseboom, W., et Nishida, S. (2013). The sense of agency is action–effect causality perception based on cross-modal grouping. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, *280*(1763), 20130991.

Kenny, D. A., Kaniskan, B., et McCoach, D. B. (2015). The performance of rmsea in models with small degrees of freedom. *Sociological methods & research*, *44*(3), 486–507.

Kintsch, W. (2009). Learning and constructivism. In *Constructivist instruction* (pp. 235–253). Routledge.

Kirschner, P., Sweller, J., et Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work : An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist*, *41*(2), 75–86.

Klein, E., Nuerk, H.-C., Wood, G., Knops, A., et Willmes, K. (2009). The exact vs. approximate distinction in numerical cognition may not be exact, but only approximate : How different processes work together in multi-digit addition. *Brain and cognition*, *69*(2), 369–381.

Kline, R. B. (2015). *Principles and practice of structural equation modeling*. Guilford publications.

Klingenberg, S., Jørgensen, M. L., Dandanell, G., Skriver, K., Mottelson, A., et Makransky, G. (2020). Investigating the effect of teaching as a generative learning strategy when learning through desktop and immersive vr : A media and methods experiment. *British Journal of Educational Technology*, *51*(6), 2115–2138.

Knoblich, G., et Kircher, T. T. (2004). Deceiving oneself about being in control : conscious detection of changes in visuomotor coupling. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *30*(4), 657.

Koch, I., et Kunde, W. (2002). Verbal response-effect compatibility. *Memory & Cognition*, *30*(8), 1297–1303.

Koenig, A. M., et Eagly, A. H. (2005). Stereotype threat in men on a test of social sensitivity. *Sex Roles*, *52*(7), 489–496.

Kolb, A. Y., et Kolb, D. A. (2017). Experiential learning theory as a guide for experiential educators in higher education. *Experiential Learning & Teaching in Higher Education*, *1*(1), 7–44.

Kong, G., He, K., et Wei, K. (2017). Sensorimotor experience in virtual reality enhances sense of agency associated with an avatar. *Consciousness and cognition*, *52*, 115–124.

Koo, T. K., et Li, M. Y. (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of chiropractic medicine*, *15*(2), 155–163.

Körding, K. P., et Wolpert, D. M. (2004). Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature*, *427*(6971), 244–247.

Kormi-Nouri, R., et Nilsson, L.-G. (2001). The motor component. *Memory for action : A distinct form of episodic memory ?*, 97.

Kourtis, D., et Vingerhoets, G. (2015). Perceiving objects by their function : An eeg study on feature saliency and prehensile affordances. *Biological psychology*, *110*, 138–147.

Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of experimental Psychology : human Perception and Performance*, *27*(2), 387.

Lachman, M. E., et Weaver, S. L. (1998). The sense of control as a moderator of social class differences in health and well-being. *Journal of personality and social psychology*, *74*(3), 763.

Lakoff, G., et Núñez, R. (2000). *Where mathematics comes from* (Vol. 6). New York : Basic Books.

Lambon Ralph, M. A., et Patterson, K. (2008). Generalization and differentiation in semantic memory : insights from semantic dementia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1124*(1), 61–76.

Lee, E. A.-L., Wong, K. W., et Fung, C. C. (2010). How does desktop virtual reality enhance learning outcomes ? a structural equation modeling approach. *Computers & Education*, *55*(4), 1424–1442.

Lee, J. H., Han, I. H., Choi, B. K., Nam, K. H., Kim, D. H., et Lee, C. S. (2017). Virtual preoperative simulation for excision of spinal tumors : surgeon processing of medical computer-assisted design software. *Korean Journal of Spine*, *14*(4), 170.

Lengenfelder, J., Chiaravalloti, N. D., et DeLuca, J. (2007). The efficacy of the generation effect in improving new learning in persons with traumatic brain injury. *Rehabilitation Psychology*, *52*(3), 290.

Leube, D. T., Knoblich, G., Erb, M., Grodd, W., Bartels, M., et Kircher, T. T. (2003). The neural correlates of perceiving one's own movements. *Neuroimage*, *20*(4), 2084–2090.

Levy, B. (1996). Improving memory in old age through implicit self-stereotyping. *Journal of personality and social psychology*, *71*(6), 1092.

Libet, B., Wright Jr, E. W., et Gleason, C. A. (1983). Preparation-or intention-to-act, in relation to pre-event potentials recorded at the vertex. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, *56*(4), 367–372.

Lindner, A., Thier, P., Kircher, T. T., Haarmeier, T., et Leube, D. T. (2005). Disorders of agency in schizophrenia correlate with an inability to compensate for the sensory consequences of actions. *Current Biology*, *15*(12), 1119–1124.

Linser, K., et Goschke, T. (2007). Unconscious modulation of the conscious experience of voluntary control. *Cognition*, *104*(3), 459–475.

Loon, N. Y. C. (2020). The memory effects of agency.

MacCullough, D. L. (2007). *A study of experts' understanding of arithmetic mean*. The Pennsylvania State University.

MacDonald, P. A., et Paus, T. (2003). The role of parietal cortex in awareness of self-generated movements : a transcranial magnetic stimulation study. *Cerebral Cortex*, *13*(9), 962–967.

Maeda, T., Takahata, K., Muramatsu, T., Okimura, T., Koreki, A., Iwashita, S., ... Kato, M. (2013). Reduced sense of agency in chronic schizophrenia with predominant negative symptoms. *Psychiatry research*, *209*(3), 386–392.

Magidson, J. F., Roberts, B. W., Collado-Rodriguez, A., et Lejuez, C. (2014). Theory-driven intervention for changing personality : expectancy value theory, behavioral activation, and conscientiousness. *Developmental psychology*, *50*(5), 1442.

Maier, S. F., et Seligman, M. E. (2016). Learned helplessness at fifty : Insights from neuroscience. *Psychological review*, *123*(4), 349.

Makransky, G., Borre-Gude, S., et Mayer, R. E. (2019). Motivational and cognitive benefits of training in immersive virtual reality based on multiple assessments. *Journal of Computer Assisted Learning*, *35*(6), 691–707.

Makransky, G., et Lilleholt, L. (2018). A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education. *Educational Technology Research and Development*, *66*(5), 1141–1164.

Makransky, G., et Petersen, G. B. (2019). Investigating the process of learning with desktop virtual reality : A structural equation modeling approach. *Computers & Education*, *134*, 15–30.

Makransky, G., et Petersen, G. B. (2021). The cognitive affective model of immersive learning (camil) : a theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality. *Educational Psychology Review*, 1–22.

Makransky, G., Terkildsen, T. S., et Mayer, R. E. (2019a). Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning. *Learning and Instruction*, *60*, 225–236.

Makransky, G., Terkildsen, T. S., et Mayer, R. E. (2019b). Role of subjective and objective measures of cognitive processing during learning in explaining the spatial contiguity effect. *Learning and Instruction*, *61*, 23–34.

Manjrekar, S., Sandilya, S., Bhosale, D., Kanchi, S., Pitkar, A., et Gondhalekar, M. (2014). Cave : An emerging immersive technology–a review. In *2014 uksim-amss 16th in-*

ternational conference on computer modelling and simulation (pp. 131–136).

Mäntylä, T., et Nilsson, L.-G. (1983). Are my cues better than your cues ?| uniqueness and reconstruction as prerequisites for optimal recall of verbal materials. *Scandinavian Journal of Psychology*, *24*(1), 303–312.

Mardia, K. V. (1974). Applications of some measures of multivariate skewness and kurtosis in testing normality and robustness studies. *Sankhyā : The Indian Journal of Statistics, Series B*, 115–128.

Maresky, H., Oikonomou, A., Ali, I., Ditkofsky, N., Pakkal, M., et Ballyk, B. (2019). Virtual reality and cardiac anatomy : Exploring immersive three-dimensional cardiac imaging, a pilot study in undergraduate medical anatomy education. *Clinical Anatomy*, *32*(2), 238–243.

Market, G. N. (2017). Zion market research.

Marnich, M. A. (2008). *A knowledge structure for the arithmetic mean : Relationships between statistical conceptualizations and mathematical concepts* (Thèse de doctorat non publiée). University of Pittsburgh.

Marshall, C. (2017). Montessori education : a review of the evidence base. *npj Science of Learning*, *2*(1), 1–9.

Martín-Gutiérrez, J., Mora, C. E., Añorbe-Díaz, B., et González-Marrero, A. (2017). Virtual technologies trends in education. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, *13*(2), 469–486.

Mathews, D., et Clark, J. (2003). Successful students' conceptions of mean, standard deviation, and the central limit theorem. *Unpublished paper. Retrieved October*, *20*, 2007.

Mathôt, S., Schreij, D., et Theeuwes, J. (2012). Opensesame : An open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior research methods*, *44*(2), 314–324.

Meehan, M., Insko, B., Whitton, M., et Brooks Jr, F. P. (2002). Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *Acm transactions on graphics (tog)*, *21*(3), 645–652.

Mestre, D. R. (2017). Cave versus head-mounted displays : ongoing thoughts. *Electronic Imaging*, *2017*(3), 31–35.

Meyer, O. A., Omdahl, M. K., et Makransky, G. (2019). Investigating the effect of pretraining when learning through immersive virtual reality and video : A media and methods experiment. *Computers & Education*, *140*, 103603.

Mezulis, A. H., Abramson, L. Y., Hyde, J. S., et Hankin, B. L. (2004). Is there a universal positivity bias in attributions ? a meta-analytic review of individual, developmental, and cultural differences in the self-serving attributional bias. *Psychological bulletin*, *130*(5), 711.

Michaels, C. F., et Carello, C. (1981). *Direct perception*. Citeseer.

Miele, D. B., Wager, T. D., Mitchell, J. P., et Metcalfe, J. (2011). Dissociating neural correlates of action monitoring and metacognition of agency. *Journal of cognitive neuroscience*, *23*(11), 3620–3636.

Mikropoulos, T. A., et Natsis, A. (2011). Educational virtual environments : A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & Education*, *56*(3), 769–780.

Montessori, M., Hunt, J. M., et Valsiner, J. (2017). *The montessori method*. Routledge.

Moore, J. W., et Haggard, P. (2008). Awareness of action : Inference and prediction. *Consciousness and cognition*, *17*(1), 136–144.

Moore, J. W., Middleton, D., Haggard, P., et Fletcher, P. C. (2012). Exploring implicit and explicit aspects of sense of agency. *Consciousness and cognition*, *21*(4), 1748–1753.

Moore, J. W., et Obhi, S. S. (2012). Intentional binding and the sense of agency : a review. *Consciousness and cognition*, *21*(1), 546–561.

Moore, J. W., Ruge, D., Wenke, D., Rothwell, J., et Haggard, P. (2010). Disrupting the experience of control in the human brain : pre-supplementary motor area contributes to the sense of agency. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, *277*(1693), 2503–2509.

Moore, J. W., Tang, T. C., et Cioffi, M. C. (2020). Psychology of consciousness : Theory, research, and practice.

Moore, J. W., Wegner, D. M., et Haggard, P. (2009). Modulating the sense of agency with external cues. *Consciousness and cognition*, *18*(4), 1056–1064.

Muto, H., Matsushita, S., et Morikawa, K. (2017). Agent's symmetry elicits egocentric transformations for spatial perspective-taking. In *Cogsci*.

Mütterlein, J. (2018). The three pillars of virtual reality ? investigating the roles of immersion, presence, and interactivity. In *Proceedings of the 51st hawaii international conference on system sciences.*

Niehorster, D. C., Li, L., et Lappe, M. (2017). The accuracy and precision of position and orientation tracking in the htc vive virtual reality system for scientific research. *i-Perception*, *8*(3), 2041669517708205.

Nosofsky, R. M. (1992). Similarity scaling and cognitive process models. *Annual review of Psychology*, *43*(1), 25–53.

Nosofsky, R. M., Palmeri, T. J., et McKinley, S. C. (1994). Rule-plus-exception model of classification learning. *Psychological review*, *101*(1), 53.

Núñez, R. (2008). A fresh look at the foundations of mathematics : Gesture and the psychological reality of conceptual metaphor. *Metaphor and gesture*, 93–114.

Obhi, S. S., et Hall, P. (2011). Sense of agency and intentional binding in joint action. *Experimental brain research*, *211*(3-4), 655.

Oker, A. M. (2009). *L'effet de distinctivité dans les tâches implicites et explicites de mémoire : une explication en termes d'intégration multimodale* (Thèse de doctorat

non publiée). Université Lumière-Lyon II.

Oren, E., Friedmann, N., et Dar, R. (2016). Things happen : individuals with high obsessive–compulsive tendencies omit agency in their spoken language. *Consciousness and cognition*, *42*, 125–134.

O'connor, B. P. (2000). Spss and sas programs for determining the number of components using parallel analysis and velicer's map test. *Behavior research methods, instruments, & computers*, *32*(3), 396–402.

Padrao, G., Gonzalez-Franco, M., Sanchez-Vives, M. V., Slater, M., et Rodriguez-Fornells, A. (2016). Violating body movement semantics : Neural signatures of self-generated and external-generated errors. *Neuroimage*, *124*, 147–156.

Pan, C., Lu, H., Gong, J., Guo, Y., Li, Z., et Xie, P. (2021). High schizotypy conditionally have a weaker sense of agency. *Current Psychology*, 1–7.

Pan, X., Gillies, M., Barker, C., Clark, D. M., et Slater, M. (2012). Socially anxious and confident men interact with a forward virtual woman : an experimental study. *PloS one*, *7*(4), e32931.

Papanastasiou, G., Drigas, A., Skianis, C., Lytras, M., et Papanastasiou, E. (2019). Virtual and augmented reality effects on k-12, higher and tertiary education students' twenty-first century skills. *Virtual Reality*, *23*(4), 425–436.

Parks-Leduc, L., Feldman, G., et Bardi, A. (2015). Personality traits and personal values : A meta-analysis. *Personality and Social Psychology Review*, *19*(1), 3–29.

Parmaxi, A. (2020). Virtual reality in language learning : A systematic review and implications for research and practice. *Interactive learning environments*, 1–13.

Parong, J., et Mayer, R. E. (2018). Learning science in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*, *110*(6), 785.

Parsons, T. D., Gaggioli, A., et Riva, G. (2017). Virtual reality for research in social neuroscience. *Brain sciences*, *7*(4), 42.

Passig, D., Tzuriel, D., et Eshel-Kedmi, G. (2016). Improving children's cognitive modifiability by dynamic assessment in 3d immersive virtual reality environments. *Computers & Education*, *95*, 296–308.

Paulhus, D. L., et Carey, J. M. (2011). The fad–plus : Measuring lay beliefs regarding free will and related constructs. *Journal of personality assessment*, *93*(1), 96–104.

Petrick, C. J. (2012). *Every body move : learning mathematics through embodied actions* (Thèse de doctorat non publiée).

Piaget, J., et Cook, M. T. (1952). The origins of intelligence in children.

Polito, V., Barnier, A. J., Woody, E. Z., et Connors, M. H. (2014). Measuring agency change across the domain of hypnosis. *Psychology of Consciousness : Theory, Research, and Practice*, *1*(1), 3.

Pronin, E., Wegner, D. M., McCarthy, K., et Rodriguez, S. (2006). Everyday magical powers : The role of apparent mental causation in the overestimation of personal

influence. *Journal of personality and social psychology*, *91*(2), 218.

Purdie-Vaughns, V., Cohen, G., Garcia, J., Sumner, R., Cook, J., et Apfel, N. (2009). Improving minority academic performance : How a values-affirmation intervention works. *Teachers College Record*.

Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., et Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education : Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, *147*, 103778.

Raubenheimer, J. (2004). An item selection procedure to maximize scale reliability and validity. *SA Journal of Industrial Psychology*, *30*(4), 59–64.

Revelle, W. (2015). Package 'psych'. *The comprehensive R archive network*, *337*, 338.

Richards, D., et Taylor, M. (2015). A comparison of learning gains when using a 2d simulation tool versus a 3d virtual world : An experiment to find the right representation involving the marginal value theorem. *Computers & Education*, *86*, 157–171.

Rietveld, E., et Kiverstein, J. (2014). A rich landscape of affordances. *Ecological psychology*, *26*(4), 325–352.

Riva, G. (2005). Virtual reality in psychotherapy. *Cyberpsychology & behavior*, *8*(3), 220–230.

Riva, G., Davide, F., et IJsselsteijn, W. A. (2003). Being there : The experience of presence in mediated environments. *Being there : Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments*, *5*.

Riva, G., Gaggioli, A., Villani, D., Preziosa, A., Morganti, F., Corsi, R., ... Vezzadini, L. (2007). Neurovr : an open source virtual reality platform for clinical psychology and behavioral neurosciences. In *Mmvr* (pp. 394–399).

Rizzolatti, G., et Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annu. Rev. Neurosci.*, *27*, 169–192.

Rosseel, Y. (2012). Lavaan : An r package for structural equation modeling and more. version 0.5–12 (beta). *Journal of statistical software*, *48*(2), 1–36.

Rotter, J. B. (1966). Generalized expectancies for internal versus external control of reinforcement. *Psychological monographs : General and applied*, *80*(1), 1.

Rubo, M., Messerli, N., et Munsch, S. (2021). The human source memory system struggles to distinguish virtual reality and reality. *Computers in Human Behavior Reports*, *4*, 100111.

Ruess, M., Thomaschke, R., et Kiesel, A. (2017). The time course of intentional binding. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *79*(4), 1123–1131.

Ruess, M., Thomaschke, R., et Kiesel, A. (2018). Intentional binding of visual effects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *80*(3), 713–722.

Sachs, G., et al. (2016). Virtual & augmented reality understanding the race for the next computing platform. *Equity Research*, *13*.

Salzman, M. C., Dede, C., Loftin, R. B., et Chen, J. (1999). A model for understanding

how virtual reality aids complex conceptual learning. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, *8*(3), 293–316.

Sanz, F. A., Olivier, A.-H., Bruder, G., Pettré, J., et Lécuyer, A. (2015). Virtual proxemics : Locomotion in the presence of obstacles in large immersive projection environments. In *2015 ieee virtual reality (vr)* (pp. 75–80).

Sato, A. (2009). Both motor prediction and conceptual congruency between preview and action-effect contribute to explicit judgment of agency. *Cognition*, *110*(1), 74–83.

Sato, A., et Yasuda, A. (2005). Illusion of sense of self-agency : discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, *94*(3), 241–255.

Schmader, T., Forbes, C. E., Zhang, S., et Berry Mendes, W. (2009). A metacognitive perspective on the cognitive deficits experienced in intellectually threatening environments. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *35*(5), 584–596.

Schulte-Rüther, M., Markowitsch, H. J., Shah, N. J., Fink, G. R., et Piefke, M. (2008). Gender differences in brain networks supporting empathy. *Neuroimage*, *42*(1), 393–403.

Sherman, W. R., et Craig, A. B. (2003). Understanding virtual reality. *San Francisco, CA : Morgan Kauffman*.

Siegler, R. S., et Booth, J. L. (2005). Development of numerical estimation. *Handbook of mathematical cognition*, 197–212.

Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, *364*(1535), 3549–3557.

Slater, M., et Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (five) : Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, *6*(6), 603–616.

Smith, D. G., Rosenstein, J. E., Nikolov, M. C., et Chaney, D. A. (2019). The power of language : Gender, status, and agency in performance evaluations. *Sex Roles*, *80*.

Smith, P. K., Jostmann, N. B., Galinsky, A. D., et Van Dijk, W. W. (2008). Lacking power impairs executive functions. *Psychological science*, *19*(5), 441–447.

Smith, S., et Ericson, E. (2009). Using immersive game-based virtual reality to teach fire-safety skills to children. *Virtual reality*, *13*(2), 87–99.

Spencer, S. J., Steele, C. M., et Quinn, D. M. (1999). Stereotype threat and women's math performance. *Journal of experimental social psychology*, *35*(1), 4–28.

Spengler, S., von Cramon, D. Y., et Brass, M. (2009). Was it me or was it you ? how the sense of agency originates from ideomotor learning revealed by fmri. *Neuroimage*, *46*(1), 290–298.

Stanescu-Cosson, R., Pinel, P., van de Moortele, P.-F., Le Bihan, D., Cohen, L., et Dehaene, S. (2000). Understanding dissociations in dyscalculia : a brain imaging study

of the impact of number size on the cerebral networks for exact and approximate calculation. *Brain*, *123*(11), 2240–2255.

Steele, C. M., et Aronson, J. (1995). Stereotype threat and the intellectual test performance of african americans. *Journal of personality and social psychology*, *69*(5), 797.

Steptoe, W., Steed, A., et Slater, M. (2013). Human tails : ownership and control of extended humanoid avatars. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, *19*(4), 583–590.

Stipek, D. J., et Weisz, J. R. (1981). Perceived personal control and academic achievement. *Review of educational Research*, *51*(1), 101–137.

Stoffregen, T. A. (2003). Affordances as properties of the animal-environment system. *Ecological psychology*, *15*(2), 115–134.

Stoffregen, T. A. (2004). Breadth and limits of the affordance concept. *Ecological Psychology*, *16*(1), 79–85.

Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the december 9-11, 1968, fall joint computer conference, part i* (pp. 757–764).

Synofzik, M. (2015). Comparators and weightings. *The sense of agency*, *289*.

Synofzik, M., Thier, P., Leube, D. T., Schlotterbeck, P., et Lindner, A. (2010). Misattributions of agency in schizophrenia are based on imprecise predictions about the sensory consequences of one's actions. *Brain*, *133*(1), 262–271.

Synofzik, M., Thier, P., et Lindner, A. (2006). Internalizing agency of self-action : perception of one's own hand movements depends on an adaptable prediction about the sensory action outcome. *Journal of neurophysiology*, *96*(3), 1592–1601.

Synofzik, M., Vosgerau, G., et Newen, A. (2008). Beyond the comparator model : a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and cognition*, *17*(1), 219–239.

Synofzik, M., Vosgerau, G., et Voss, M. (2013). The experience of agency : an interplay between prediction and postdiction. *Frontiers in psychology*, *4*, 127.

Synofzik, M., et Voss, M. (2010). Disturbances of the sense of agency in schizophrenia. In *Neuropsychology of the sense of agency* (pp. 145–155). Springer.

Taconnat, L., Froger, C., Sacher, M., et Isingrini, M. (2008). Generation and associative encoding in young and old adults : The effect of the strength of association between cues and targets on a cued recall task. *Experimental Psychology*, *55*(1), 23–30.

Takahata, K., Takahashi, H., Maeda, T., Umeda, S., Suhara, T., Mimura, M., et Kato, M. (2012). It's not my fault : postdictive modulation of intentional binding by monetary gains and losses. *PloS one*, *7*(12), e53421.

Tanaka, T., Matsumoto, T., Hayashi, S., Takagi, S., et Kawabata, H. (2019). What makes action and outcome temporally close to each other : A systematic review and meta-analysis of temporal binding. *Timing & Time Perception*, *7*(3), 189–218.

Tapal, A., Oren, E., Dar, R., et Eitam, B. (2017). The sense of agency scale : A measure of consciously perceived control over one's mind, body, and the immediate environment. *Frontiers in psychology*, *8*, 1552.

Thorndike, E. L. (1911). A scale for measuring the merit of english writing. *Science*, *33*(859), 935–938.

Tilhou, R., Taylor, V., et Crompton, H. (2020). 3d virtual reality in k-12 education : A thematic systematic review. *Emerging technologies and pedagogies in the curriculum*, 169–184.

Tobias, S., et Duffy, T. M. (2009). *Constructivist instruction : Success or failure ?* Routledge.

Trizano-Hermosilla, I., et Alvarado, J. M. (2016). Best alternatives to cronbach's alpha reliability in realistic conditions : congeneric and asymmetrical measurements. *Frontiers in psychology*, *7*, 769.

Tucker, M., et Ellis, R. (1998). On the relations between seen objects and components of potential actions. *Journal of Experimental Psychology : Human perception and performance*, *24*(3), 830.

Tucker, M., et Ellis, R. (2001). The potentiation of grasp types during visual object categorization. *Visual cognition*, *8*(6), 769–800.

Tucker, M., et Ellis, R. (2004). Action priming by briefly presented objects. *Acta psychologica*, *116*(2), 185–203.

Uittenhove, K., et Lemaire, P. (2015). Numerical cognition during cognitive aging.

Usoh, M., Arthur, K., Whitton, M. C., Bastos, R., Steed, A., Slater, M., et Brooks Jr, F. P. (1999). Walking> walking-in-place> flying, in virtual environments. In *Proceedings of the 26th annual conference on computer graphics and interactive techniques* (pp. 359–364).

Utts, J. (2003). What educated citizens should know about statistics and probability. *The American Statistician*, *57*(2), 74–79.

Valås, H. (2001). Learned helplessness and psychological adjustment ii : Effects of learning disabilities and low achievement. *Scandinavian Journal of Educational Research*, *45*(2), 101–114.

Valverde-Berrocoso, J., Garrido-Arroyo, M. d. C., Burgos-Videla, C., et Morales-Cevallos, M. B. (2020). Trends in educational research about e-learning : A systematic literature review (2009–2018). *Sustainability*, *12*(12), 5153.

Vastano, R., Deschrijver, E., Pozzo, T., et Brass, M. (2018). Temporal binding effect in the action observation domain : Evidence from an action-based somatosensory paradigm. *Consciousness and cognition*, *60*, 1–8.

Versace, R., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, E., et Brunel, L. (2014). Act-in : An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology*, *26*(3), 280–306.

Verschoor, S. A., et Hommel, B. (2017). Self-by-doing : The role of action for self-acquisition. *Social Cognition*, *35*(2), 127–145.

von Glasersfeld, E. (1989). Facts and the self from a constructivist point of view. *Poetics*, *18*(4-5), 435–448.

Von Glasersfeld, E. (2005). Thirty years constructivism. *Constructivist Foundations*, *1*(1).

Voss, M., Ingram, J. N., Haggard, P., et Wolpert, D. M. (2006). Sensorimotor attenuation by central motor command signals in the absence of movement. *Nature neuroscience*, *9*(1), 26–27.

Vygotsky, L. S. (1978). Socio-cultural theory. *Mind in society*, *6*, 52–58.

Warren Jr, W. H. (1998). Visually controlled locomotion : 40 years later. *Ecological Psychology*, *10*(3-4), 177–219.

Waszak, F., Cardoso-Leite, P., et Hughes, G. (2012). Action effect anticipation : neurophysiological basis and functional consequences. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *36*(2), 943–959.

Watanabe, T., et Soraci, S. A. (2004). The self-choice effect from a multiple-cue perspective. *Psychonomic bulletin & review*, *11*(1), 168–172.

Webster, R. (2016). Declarative knowledge acquisition in immersive virtual learning environments. *Interactive Learning Environments*, *24*(6), 1319–1333.

Wegner, D. M. (2003). The mind's best trick : how we experience conscious will. *Trends in cognitive sciences*, *7*(2), 65–69.

Wegner, D. M., et Sparrow, B. (2004). Authorship processing.

Wegner, D. M., Sparrow, B., et Winerman, L. (2004). Vicarious agency : experiencing control over the movements of others. *Journal of personality and social psychology*, *86*(6), 838.

Wegner, D. M., et Wheatley, T. (1999). Apparent mental causation : Sources of the experience of will. *American psychologist*, *54*(7), 480.

Weiner, B. (2000). Attributional thoughts about consumer behavior. *Journal of Consumer research*, *27*(3), 382–387.

Wen, W., Yamashita, A., et Asama, H. (2015). The influence of action-outcome delay and arousal on sense of agency and the intentional binding effect. *Consciousness and cognition*, *36*, 87–95.

Wicherts, J. M., Dolan, C. V., Hessen, D. J., Oosterveld, P., Van Baal, G. C. M., Boomsma, D. I., et Span, M. M. (2004). Are intelligence tests measurement invariant over time ? investigating the nature of the flynn effect. *Intelligence*, *32*(5), 509–537.

Wilke, C., Synofzik, M., et Lindner, A. (2012). The valence of action outcomes modulates the perception of one's actions. *Consciousness and cognition*, *21*(1), 18–29.

Winkler, P., Stiens, P., Rauh, N., Franke, T., et Krems, J. (2020). How latency, action modality and display modality influence the sense of agency : a virtual reality study.

Virtual Reality, *24*(3), 411–422.

Witmer, B. G., et Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence*, *7*(3), 225–240.

Wolpe, N., Haggard, P., Siebner, H. R., et Rowe, J. B. (2013). Cue integration and the perception of action in intentional binding. *Experimental brain research*, *229*(3), 467–474.

Wolpert, D. M., et Flanagan, J. R. (2001). Motor prediction. *Current biology*, *11*(18), R729–R732.

Wolpert, D. M., et Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature neuroscience*, *3*(11), 1212–1217.

Won, A. S., Bailenson, J., Lee, J., et Lanier, J. (2015). Homuncular flexibility in virtual reality. *Journal of Computer-Mediated Communication*, *20*(3), 241–259.

Woolfolk, R. L., Doris, J. M., et Darley, J. M. (2006). Identification, situational constraint, and social cognition : Studies in the attribution of moral responsibility. *Cognition*, *100*(2), 283–301.

Ye, L., Cardwell, W., et Mark, L. S. (2009). Perceiving multiple affordances for objects. *Ecological Psychology*, *21*(3), 185–217.

Yoshie, M., et Haggard, P. (2013). Negative emotional outcomes attenuate sense of agency over voluntary actions. *Current Biology*, *23*(20), 2028–2032.

Zacharia, Z. C., Manoli, C., Xenofontos, N., De Jong, T., Pedaste, M., van Riesen, S. A., ... Tsourlidaki, E. (2015). Identifying potential types of guidance for supporting student inquiry when using virtual and remote labs in science : A literature review. *Educational technology research and development*, *63*(2), 257–302.