



THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 2 - Jean Jaurès

Présentée et soutenue par
Virginie BAYET

Le 20 septembre 2023

La prise de perspective d'autrui au coeur des habiletés de cognition sociale: étude de l'impact de la perturbation des systèmes vestibulaires et proprioceptifs lors de protocoles en impesanteur simulée

Ecole doctorale : **CLESCO - Comportement, Langage, Education, Socialisation, Cognition**

Spécialité : **Neurosciences**

Unité de recherche :

CLLE - Unité Cognition, Langues, Langage, Ergonomie

Thèse dirigée par

Claudine MELAN et Mickaël CAUSSE

Jury

Mme Christine ASSAIANTE, Rapporteur
M. Benoit BOLMONT, Rapporteur
M. Lionel BRINGOUX, Examineur
M. Vsevolod Peysakhovich, Examineur
Mme Claudine MELAN, Directrice de thèse
M. Mickaël CAUSSE, Co-directeur de thèse

Résumé

La gravité fournit au système nerveux central des informations sensorielles corporelles et visuelles stables, essentielles à la navigation spatiale et aux tâches collaboratives. Au contraire, dans l'espace, les forces gravitaires n'agissent que très faiblement sur le corps et provoquent une perturbation des entrées sensorielles vestibulaires et proprioceptives. Connaître la position de son corps dans l'espace est essentiel lorsqu'on doit considérer le point de vue d'autrui afin de s'engager dans une action donnée. Ce travail de recherche s'intéresse à l'impact de ces perturbations sensorielles sur les aptitudes à prendre en compte le point de vue d'autrui grâce à deux modèles qui permettent de recréer en partie, sur Terre, les effets physiologiques de l'impesanteur. L'étude 1 a été réalisée grâce à la participation de 12 volontaires de sexe masculin (moyenne d'âge : 44 ans) dans le modèle de vol parabolique induisant principalement une perturbation du système vestibulaire. L'étude 2, réalisée en immersion sèche, qui induit davantage une perturbation des entrées proprioceptives, a permis d'observer les effets d'une contre-mesure sur les aptitudes de prise de perspective d'autrui grâce au port d'un dispositif de brassards de cuisse, permettant de contrer en partie les effets physiologiques néfastes de l'impesanteur. 18 participants de sexe masculin (moyenne d'âge : 33,4) ont été répartis dans 2 groupes, un groupe « test » et un groupe portant la contre-mesure. Dans les deux études, les participants ont réalisé une tâche expérimentale de prise de perspective.

Les résultats de l'étude 1 ont révélé des temps de réponses significativement plus rapides en impesanteur simulée dans les conditions de la tâche impliquant une projection mentale dans des positions spatiales inconnues (inclinaison de l'avatar de 45°) suggérant une facilitation à réaliser la prise de perspective de l'avatar. Les résultats de l'étude 2 ont également montré des temps de réponses plus rapides dans les mêmes conditions, uniquement dans le groupe de participants qui ne portent pas les brassards de cuisse. Dans ce même groupe, des mesures d'oxymétrie cérébrale (fNIRS) et d'oculométrie ont montré une activation des zones corticales temporales supérieures au cours de la tâche de prise de perspective ainsi que des temps de fixations oculaires plus longs sur l'avatar, par rapport au groupe portant la contre-mesure. Le cortex temporal étant activé dans la prise en compte d'autrui et de façon plus large dans les capacités de théorie de l'esprit, ces résultats suggèrent un traitement plus profond de la position de l'avatar et de la perspective d'autrui. Les effets de l'impesanteur sur les processus de prise de perspective d'autrui seraient spécifiques car les performances des 2 groupes ne diffèrent pas significativement dans les tâches sollicitant des processus cognitifs non-sociaux, impliqués dans ce type de tâche, notamment certains processus exécutifs, de mémoire de travail et attentionnels.

Ce travail de recherche met en évidence, d'une part, que les perturbations sensorielles en impesanteur viennent améliorer la capacité à prendre rapidement la perspective d'autrui. La perte partielle de sensations corporelles dans ces modèles d'impesanteur simulée perturberait la représentation sensori-motrice de son propre corps ainsi le traitement de la perspective d'autrui serait plus rapide à mettre en œuvre sans nécessiter le recours à d'importantes ressources cognitives. D'autre part, l'utilisation des brassards de cuisse comme contre-mesure a permis de contrebalancer ces effets ce qui conforte dans l'efficacité de cette contre-mesure. Afin de préserver cette facilitation à la prise de perspective d'autrui, il conviendrait d'entraîner les astronautes à se focaliser sur l'utilisation de repères spécifiques en utilisant des contre-mesures complémentaires.

Mots clés : Cognition sociale, Prise de perspective, Impesanteur, Vol parabolique, Immersion sèche

Abstract

Gravity provides the central nervous system with stable somatic and visual sensory information essential for spatial navigation and cooperative tasks. In space, however, gravitational forces act very weakly on the body, disrupting vestibular and proprioceptive sensory inputs. Knowing one's body position in space is essential when you have to consider the point of view of others in order to perform a given action. This research examines the impact of these sensory perturbations on the ability to take into account the point of view of others, using two models that partly replicate the physiological effects of weightlessness on Earth. Study 1 involved 12 male volunteers (mean age 44 years) in a parabolic flight model, which primarily disrupts the vestibular system. Study 2, was performed in the dry immersion model, which disrupts predominantly proprioceptive inputs and examined the effects of a countermeasure on perspective taking using a thigh cuff device to partially compensate for the adverse physiological effects of weightlessness.

18 male participants (mean age 33.4 years) were divided into two groups, a "test" group and a group wearing the countermeasure (thigh cuffs). In both studies, participants performed an experimental perspective taking task. The results of Study 1 showed significantly faster responses in simulated weightlessness in the task conditions requiring to perform a mental projection into unexperienced positions (avatar was tilted of 45°), suggesting facilitation of avatar perspective taking. The results of Study 2 also revealed faster responding under the same conditions, only in the group of participants not wearing the thigh cuffs. In the same group, brain oximetry (fNIRS) data showed higher activation of temporal cortical areas during the perspective taking task, and oculomotor measures revealed longer eye fixation times on the avatar, compared to the group wearing the countermeasure. The temporal cortex being activated in social perspective taking tasks and, more broadly, in theory of mind abilities, these results suggest deeper processing of the avatar and social perspective-taking. The effects of microgravity on perspective-taking processes appeared to be specific as performance of the two groups did not differ significantly in tasks testing non-social cognitive processes that are also involved in perspective-taking, i.e. certain executive, working memory and attentional processes. This research shows that sensory perturbations in weightlessness improve the ability to quickly take another person's perspective. The partial loss of bodily sensations in these models of simulated weightlessness would disrupt the sensorimotor representation of one's own body, and the processing of another person's perspective would be faster to implement without requiring the use of significant cognitive resources. The use of thigh cuffs as a countermeasure counterbalanced these effects, which confirms the effectiveness of this countermeasure. In order to maintain this facilitation of perspective taking, astronauts should

be trained to focus on the use of specific reference frames by using complementary countermeasures.

Key words: Social cognition, Perspective-taking, Microgravity, Parabolic flight, Dry immersion

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite très sincèrement remercier mes directeurs de thèse, Claudine Mélan et Mickaël Causse pour leur accompagnement tout au long de ces années.

Merci Claudine d'avoir été toujours présente et d'avoir fourni tout ce travail d'accompagnement, de relectures intensives et pour le temps incommensurable passé à revoir les différents documents envoyés. Merci également pour ton soutien concernant mes candidatures aux postes d'ATER que j'ai pu intégrer à l'université. La liste des remerciements serait bien trop longue mais ta disponibilité et ta bienveillance au fil de ces années ont été pour moi le moteur de ce travail de thèse.

Merci Mickaël pour ton soutien également, pour le partage de tes connaissances sur le traitement des données d'oxymétrie cérébrale et également pour ton accompagnement lors des différentes conférences en lien avec le domaine aéronautique. Cette collaboration m'a permis d'élargir mon champ de connaissances et de m'ouvrir à d'autres secteurs complémentaires à la psychologie.

Je tiens également à remercier les membres de mon jury, Christine Assaiante, Benoit Bolmont, Lionel Bringoux ainsi que Vsevolod Peysakhovich pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à l'évaluation de ce travail. Merci également aux membres de mon comité de suivi de thèse, Nadine Matton et Lionel Bringoux, qui ont apporté leurs conseils à ce travail me permettant de faire évoluer mes réflexions et de finaliser ce travail de thèse, de par leurs approbations.

Merci à l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin notamment merci à Pierre Paubel pour sa disponibilité, sa contribution dans le cadre expérimental de cette thèse mais également et surtout pour ses encouragements !

Merci au CNES pour le financement de ce projet dans le cadre de l'expérimentation de vol parabolique et d'immersion sèche. Merci à l'équipe de Novespace et à l'équipe du MEDES pour leur accueil et leur professionnalisme au cours de ces expériences.

Je souhaite remercier également tous ceux et celles qui m'ont soutenu au cours de ce périple, notamment merci à Elsa et Laurence du « *bureau du fond* » au Centre d'investigation clinique, ainsi qu'à toutes les personnes que j'ai pu rencontrer au fil de ces années et à tous mes amis et connaissances qui m'ont apporté leurs encouragements.

Enfin, un grand merci à ma famille qui a toujours été présente pour me soutenir et m'épauler et un remerciement tout particulier à mon conjoint d'être à mes côtés depuis le début !

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	11
CONTEXTE SPATIAL	14
1. LES EFFETS PHYSIOLOGIQUES DE L'IMPESANTEUR.....	15
2. LES EFFETS PSYCHOLOGIQUES DE L'IMPESANTEUR	17
CADRE THÉORIQUE	21
1. SE REPERER ET SE REPRESENTER L'ESPACE.....	22
1.1. <i>Des cadres de référence gravitaires et visuels</i>	22
1.1.1. Un cadre de référence gravitaire comme référence verticale	22
1.1.2. Un cadre de référence allocentré basé sur la vision	24
1.2. <i>Le corps au cœur d'un processus incarné</i>	27
1.2.1. Le corps comme repère dans les transformations mentales égocentrées	27
1.2.2. Manipulation des systèmes sensoriels lors de tâches de transformations mentales égocentrées en gravité normale	30
2. LA PRISE DE PERSPECTIVE SOCIALE	34
2.1. <i>La prise de perspective d'autrui dans des contextes sociaux</i>	36
2.2. <i>Processus non-sociaux impliqués dans la prise de perspective</i>	43
3. ENVIRONNEMENTS EXTREMES ET PRISE DE PERSPECTIVE D'AUTRUI	48
3.1. <i>Des modèles terrestres de simulation de l'impesanteur</i>	48
3.1.1. Le vol parabolique.....	48
3.1.2. Le Head-Down Bed-Rest (HDBR).....	51
3.1.3. L'immersion sèche.....	53
3.2. <i>Études expérimentales en lien avec la prise de perspective d'autrui</i>	56
PROBLÉMATIQUE	59
PARTIE EXPÉRIMENTALE	63
EXPERIENCE 1 :	63
PRISE DE PERSPECTIVE EN IMPESANTEUR AU COURS DE VOLS PARABOLIQUES.....	64
<i>Étude Préliminaire en vol parabolique : mise au point du dispositif</i>	67
1. <i>Méthodologie</i>	68
1.1. Sujets.....	68
1.2. Procédure générale.....	69
1.3. Matériel.....	71
1.3.1. Tâche expérimentale de prise de perspective	73
1.3.2. Test de dépendance à l'égard du champ visuel : Rod and Frame Test.....	78
1.3.3. Quotient d'empathie.....	81
1.3.4. Évaluation de la charge mentale (NASA-TLX)	82
1.4. Hypothèses opérationnelles.....	83
1.5. Analyses statistiques.....	85
2. Résultats.....	86
3. Discussion.....	100
EXPÉRIENCE 2 :	106
PERTURBATION DES ENTREES SOMATOSENSORIELLES EN CONDITION D'IMMERSION	
SÈCHE : EFFET D'UNE CONTRE-MESURE	106
1. Recrutement et caractéristiques des participants.....	110
2. Matériel.....	112
1. Mesures comportementales	112
1.1. Tâche expérimentale de prise de perspective	112
1.2. Test de dépendance à l'égard du champ visuel : RFT	112
1.3. Capacités de rotation mentale.....	113
1.4. Fonctions cognitives non-sociales (fonctions exécutives).....	114
2. Mesures physiologiques.....	119
2.1. Mesure d'oxymétrie cérébrale (NIRS).....	119

2.2.	Oculométrie	122
3.	Procédure	124
4.	Hypothèses opérationnelles	126
5.	Analyses statistiques	128
II.	Résultats	129
III.	Discussion	155
	DISCUSSION GÉNÉRALE	160
	CONCLUSION	164
BIBLIOGRAPHIE		165
FIGURES		180
TABLEAUX		185
ANNEXE 1 : CPP EXPERIENCE EN VOL PARABOLIQUE		186
ANNEXE 2 : CONSENTEMENT EXPERIENCE EN VOL PARABOLIQUE		188
ANNEXE 3 : CATEGORIES SOCIO-PROFESSIONNELLES DES PARTICIPANTS A L'ETUDE EN VOL PARABOLIQUE		190
ANNEXE 4 : QUESTIONNAIRE DE QUOTIENT D'EMPATHIE (EQ)		191
ANNEXE 5 : NASA-TLX		197
ANNEXE 6 : CARACTERISTIQUES DES GROUPES « TEST » VS « CONTRE-MESURE » ..		198
ANNEXE 7: PROTOCOLE GENERAL D'IMMERSION SECHE		199
ANNEXE 8: QUESTIONNAIRE DE SAINT ANTOINE		200
ANNEXE 9 : QUESTIONNAIRE GENERAL D'ETAT DE SANTE		201

INTRODUCTION

L'influence de l'impesanteur sur les processus cognitifs, et en particulier ceux impliqués dans les interactions sociales, a reçu peu d'attention dans la littérature scientifique. Les études menées depuis de nombreuses années dans ce domaine portent sur les modifications physiologiques et ont permis d'observer l'impact que peut avoir l'impesanteur sur le corps humain, tels que la perte osseuse, les altérations cardio-vasculaires, le mal de l'espace, etc. Pourtant, les processus cognitifs sociaux jouent un rôle crucial lors des travaux collaboratifs entre astronautes durant des missions spatiales habitées et à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS). En effet, dans les situations où il est nécessaire de prendre le point de vue d'un collaborateur, par exemple, lors de certaines manœuvres où les astronautes doivent visualiser mentalement l'orientation d'un autre membre d'équipage différemment orienté afin de relayer des informations verbales concordantes avec son point de vue (Burrough, 1998 ; Oman, 2003). Dans ces situations, il est important que les membres d'équipage se comprennent correctement et interagissent rapidement. En effet, imaginer un individu dans une position inhabituelle, comme peut l'être un astronaute incliné par rapport à un autre n'est pas une situation familière sur Terre où la gravité sert de repère pour identifier facilement le haut et le bas d'un espace ou d'une scène afin de pouvoir s'y déplacer réellement ou mentalement. En impesanteur, les repères environnementaux sont pauvres et la polarité haut/bas des surfaces fait défaut. De plus, les entrées sensorielles corporelles provenant des systèmes vestibulaires et proprioceptifs sont perturbées car les forces gravitaires qui s'exercent sur le corps sont moindres.

L'objectif de ce travail est double, d'une part, d'un point de vue théorique il s'intéresse à la prise de perspective, aptitude de cognition sociale définie comme l'habileté à regarder une situation d'un point de vue différent de son propre point de vue. Dans ce travail, la *prise de perspective sociale* est privilégiée car elle implique l'adoption du point du vue d'une autre personne, comme c'est le cas lors de situations de communication telles que décrites ci-dessus. D'autre part, d'un point de vue expérimental, il s'agit d'étudier l'impact de la perturbation des entrées sensorielles vestibulaires et proprioceptives lorsqu'il s'agit d'avoir recours à ces aptitudes de prise de perspective d'autrui.

Les aptitudes de cognition sociale reposent sur des référentiels spatiaux spécifiques. Il s'agit de cadres de références gravitaires et visuels qui permettent à l'individu d'interagir avec autrui et son environnement. L'utilisation de ces référentiels s'appuie principalement sur les repères

visuels présents dans l'environnement, dits allocentrés, l'individu se référant à un modèle vertical haut/bas aligné avec la verticale gravitaire. D'autres types de transformations mentales, égocentrées, s'appuient davantage sur les informations sensorielles provenant du corps de l'individu, notamment des systèmes vestibulaires et proprioceptifs, pour se projeter mentalement d'un autre point de vue, dans une situation donnée (Wraga et al., 1999). Lorsque l'ensemble des informations provenant de ces différents systèmes sensoriels (visuels, vestibulaires et somatosensoriels) convergent, elles contribuent à l'élaboration d'une verticale subjective. Celle-ci constitue une estimation de la verticale physique par l'individu (Luyat, 1997). Au contraire, lorsqu'il n'y aurait que peu d'informations provenant des systèmes vestibulaires et proprioceptifs, l'axe du corps constituerait un cadre de référence dominant pour la verticale subjectivement perçue lorsque le cadre visuel est appauvri comme dans les vaisseaux spatiaux (Howard & Hu, 2001). Dans une situation qui requiert de prendre le point de vue d'autrui, cela nécessite de prendre appui sur un référentiel égocentré.

D'autres processus cognitifs non-sociaux, tels que des processus d'inhibition, de mémoire et travail et d'attention seraient également sollicités dans la prise de perspective d'autrui. De nombreuses études expérimentales ont exploré la façon dont l'individu interagit avec autrui dans des dispositifs en réalité virtuelle mettant en scène un avatar et permettant d'exclure l'utilisation de repères visuels gravitaires. Cependant, la gravité physique demeure dans ces situations expérimentales. **Qu'en est-il des capacités à prendre la perspective d'autrui lors de situations extrêmes où la gravité ne constitue plus un référentiel sur lequel prendre appui et où les indices sensoriels vestibulaires et/ou proprioceptifs sont compromis ?**

L'impact de la perturbation des systèmes vestibulaires et proprioceptifs peut être étudié sur Terre au travers de modèles permettant de recréer les effets physiologiques de l'impesanteur : le vol parabolique, le repos au lit tête en bas, connu sous le terme de « Head Down Bed Rest » (HDBR), l'immersion sèche ou encore dans des dispositifs de centrifugeuse. Le HDBR et l'immersion sèche entraînent, par exemple, la perte de support au niveau du corps et de pression sur la plante des pieds ce qui entraîne un poids moins important accordé aux entrées proprioceptives.

Ce travail regroupe deux expérimentations : une première étude en vol parabolique qui prive sélectivement l'individu des informations spatiales d'origine vestibulaire et perturbe également le système proprioceptif en allégeant les contraintes gravitaires exercées sur le corps, lors des phases d'impesanteur simulée. L'objectif de cette première étude est d'étudier l'impact de ces perturbations sensorielles sur les aptitudes de prise de perspective d'autrui.

Une seconde étude en immersion sèche qui apporte une perturbation des informations sensorielles proprioceptives consiste à observer les effets d'une contre-mesure sur les aptitudes de prise de perspective d'autrui grâce au port d'un dispositif de brassards de cuisse permettant de contrebalancer en partie les effets physiologiques néfastes de l'impesanteur.

Afin d'évaluer les habiletés de prise de perspective d'autrui dans ces environnements analogues à l'impesanteur, la mise en scène en réalité virtuelle d'un environnement en 2D avec profondeur représentant l'intérieur d'un vaisseau spatial a permis de simuler une tâche coopérative. Cette tâche permet de simuler des situations rencontrées en impesanteur où l'astronaute se retrouve en flottaison sans être aligné verticalement à son collègue ou aux éléments présents dans son environnement. Le protocole a permis de dissocier différents processus de transformations mentales, respectivement allocentré et égocentré, impliquant dans le second cas une prise de perspective d'autrui (en l'occurrence celle de l'avatar) selon des orientations impossibles à prendre sur Terre et cela dans des conditions d'impesanteur simulée. De plus, des mesures physiologiques d'oxymétrie cérébrale (fNIRS) et d'oculométrie sont proposées dans la seconde étude permettant de venir compléter les données comportementales.

La première partie de cette thèse introduit des éléments théoriques en lien avec les notions que nous venons de citer précédemment. Le premier chapitre développe les éléments relatifs aux différents cadres de référence sur lesquels l'individu peut s'appuyer pour se représenter l'environnement. Puis les travaux révélant l'importance du corps dans les transformations mentales égocentrées sur lesquelles reposent les aptitudes de prise de perspective d'autrui sont résumés. Puis nous nous intéresserons aux processus cognitifs non-sociaux qui sont également sollicités dans des tâches de prise de perspective sociale sur Terre en gravité normale. Pour terminer, les différents modèles d'impesanteur simulée sur Terre seront décrits ainsi que les effets des perturbations physiologiques et sensorielles induites par ces derniers sur des tâches qui requièrent l'utilisation d'un cadre de référence égocentré.

La seconde partie, expérimentale, rapporte les résultats des deux expérimentations complémentaires réalisées dans le cadre de cette recherche : la première en vol parabolique et la seconde en immersion sèche. La troisième partie présente la discussion générale ainsi que les limites de ce travail de recherche. Enfin, une conclusion générale clôture ce manuscrit en exposant des perspectives de contribution à l'entraînement des futurs astronautes.

Contexte spatial

A partir du début du XXème siècle se formalisent des projets de construction de station spatiale et d'engins à réaction pouvant atteindre une vitesse nécessaire à la mise en orbite. Le lancement du premier satellite artificiel de la Terre en 1957 par l'URSS, le Spoutnik 1, a signé le début de la conquête spatiale et a permis d'envisager la satellisation d'un être vivant. Des animaux ont ainsi été envoyés en orbite de 1950 à 1960, afin de permettre à l'Homme d'acquérir les connaissances nécessaires sur le comportement du vivant dans le milieu spatial. En 1961, Youri Gagarine est le premier homme à séjourner dans l'espace (programme Vostok de l'Union Soviétique cf. **Figure 1**), ce qui conforte la faisabilité des vols habités dans l'espace.



Figure 1: Premier vol spatial de l'Union Soviétique avec la mission Vostok 1 – 12 Avril 1961
(Source : <https://destination-orbite.net/astronautique/compendium/les-lanceurs-russes-vostok>)

En 1969, le premier pas de l'Homme sur la Lune marque le début de la conquête d'autres planètes du système solaire. En 1971, la première station spatiale est placée en orbite (programme russe Saliout) et trois cosmonautes y séjournent durant 22 jours. Puis, la station spatiale américaine, Skylab, accueille trois équipages de trois astronautes en 1973 et 1974.

En 1986, la station spatiale russe Mir, première station modulaire assemblée en orbite, devient un lieu de vie permanent jusqu'en 2000, pour des équipages de diverses nationalités, avec un temps record de séjour d'un être humain dans l'espace de 437 jours. La Station Spatiale Internationale (ISS) (cf. **Figure 2**) a pris la relève en 2000 et se trouve, depuis, continuellement habitée par un équipage international.



Figure 2 : La Station Spatiale Internationale (Novembre 2009)
(<https://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttle/sts-129/hires/s129e009243.jpg>)

Dans les stations spatiales, des centaines d'expériences en impesanteur ont été réalisées pour étudier notamment les répercussions sur le corps mais également sur le fonctionnement cognitif de l'être humain lors de vols spatiaux prolongés en orbite, une des clés du voyage interplanétaire de demain.

1. Les effets physiologiques de l'impesanteur

La réalisation d'une mission spatiale habitée vers Mars constitue un des objectifs à moyen terme dans le domaine spatial. C'est un défi technique et humain avec une durée totale de 640 jours de vol au minimum contrastant avec les missions de 12 jours pour la Lune. Le délai nécessaire pour un retour sur Terre est également beaucoup plus long (entre 6 mois et 2 ans) comparé au retour en 3 jours depuis la Lune.

Durant le trajet aller-retour Terre-Mars, l'impesanteur serait présente au sein du vaisseau spatial, tout comme c'est le cas dans l'ISS. Cet état, communément appelé « *apesanteur* » dans le langage courant, décrit l'état d'un corps pour lequel les forces gravitationnelles et inertielles ont une résultante nulle ou presque nulle provoquant une « décharge gravitationnelle » (« *gravitational unloading* ») c'est-à-dire que l'allègement de la gravité provoque une décharge des forces sur le corps. Lors d'une exposition prolongée, celle-ci impacte les systèmes physiologiques, notamment osseux, musculaire, métabolique et nerveux. Ainsi, elle provoque une perte minérale osseuse importante, notamment dans les membres inférieurs du corps (LeBlanc et al., 2007). Les muscles, peu sollicités afin de se mouvoir dans l'espace, s'atrophient également (Tanaka et al., 2017).

Une diminution d'environ 15% du volume des muscles du dos et des jambes a ainsi été mesurée en IRM chez 16 membres d'équipage lors d'une mission de 4 à 6 mois à bord de la station Mir. Sous l'effet des forces gravitationnelles diminuées, une redistribution marquée du volume sanguin vers le haut du corps se produit (Diedrich et al., 2007) (cf. **Figure 3**) et entrainer une hypertension intracrânienne due à une pression élevée du liquide céphalo-rachidien (LCR), provoquant ainsi des pathologies sur le plan ophtalmique telles qu'un syndrome appelé VIIP (« Visual Impairment and Intracranial Pressure ») : syndrome de déficience visuelle et de pression intracrânienne (Nelson et al., 2014). De plus, des changements cérébraux structurels ont été montrés en IRM sur 27 astronautes révélant une diminution du volume de la matière grise de 2 à 5% dans les zones temporales et frontales (Koppelmans et al., 2016). Cette diminution résulterait de la redistribution du flux vasculaire cérébral, de l'augmentation de la vasoconstriction et de la redistribution du LCR (Li et al., 2015; Roberts et al., 2015). Koppelmans et al. (2016) révèlent, par ailleurs, une augmentation de 2 à 5% du volume de la matière grise dans les cortex somatosensoriel et moteur primaire. Celle-ci serait, au contraire, le reflet d'une tentative du système nerveux central d'augmenter la sensibilité des entrées sensorielles et d'adapter ainsi le contrôle des membres inférieurs à l'environnement d'impesanteur (Iwase et al., 2020; Koppelmans et al., 2016). En effet, les muscles des membres inférieurs sont largement actifs sur Terre pour contrecarrer la gravité et sont ceux qui subissent de forts changements de volume musculaire en impesanteur, par exemple après 180 jours de vol spatial chez quatre astronautes, le volume du mollet diminue en moyenne de 10 à 16% et celui de la cuisse de 4 à 7% contrairement aux bras où le volume de celui-ci varie entre +0,4 à -0,8%. De plus, la force musculaire est également plus impactée dans les membres inférieurs avec une réduction moyenne de 10 à 24% pour le genou par rapport à 7 à 16% pour le coude (Gopalakrishnan et al., 2010).

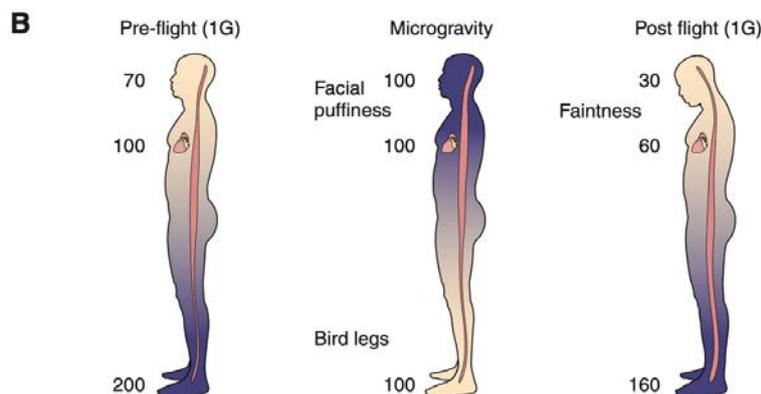


Figure 3 : Distribution du liquide tissulaire (ou fluide interstitiel). L'ombre bleue indique la distribution de ce liquide et les pressions artérielles moyennes (mmHg) sur Terre avant le vol 1g (à gauche), en impesanteur 0g (au milieu) et sur Terre en post-vol 1g (à droite). Illustration issue de Zhang & Hargens, 2018.

Plusieurs solutions ont été proposées pour lutter contre les effets néfastes liés à l'impesanteur notamment en créant une gravité artificielle au sein du vaisseau spatial, par exemple, à l'aide d'une centrifugeuse, ou en mettant le vaisseau en rotation autour de son axe principal. Cependant, ces méthodes engendrent des effets perturbateurs créant des illusions sensorielles et/ou une différence de gravité entre la tête et les pieds. Aussi, la création d'une gravité artificielle non perturbante pour le corps humain imposerait une complexité accrue du système de transport, et n'est à l'heure actuelle pas envisagée par la NASA pour les futures missions spatiales habitées. Par ailleurs, des dispositifs de contre-mesures sont étudiés afin de pouvoir améliorer les capacités des astronautes à s'adapter à l'environnement d'impesanteur. Il s'agit de programmes d'entraînements sensoriels (Bloomberg et al., 2015) ou des dispositifs tels que des brassards de cuisse permettant de limiter les déplacements des fluides corporels vers le haut du corps et ainsi de contrebalancer les effets physiologiques de l'impesanteur (Lindgren et al., 1998).

2. Les effets psychologiques de l'impesanteur

Si les phénomènes physiologiques sont non négligeables au cours de périodes prolongées en impesanteur, le facteur psychologique constitue également un paramètre important au cours de ces missions spatiales de longue durée. L'équipage se trouverait confiné pour une période exceptionnellement longue dans un espace restreint. Des études ont en effet montré que la monotonie de l'environnement et le besoin d'intimité peuvent entraîner une augmentation des tensions interpersonnelles (Connors et al., 1986; Sandal et al., 1999). De plus, le vide spatial qui entoure le vaisseau constitue un environnement hostile à la vie humaine, induisant un stress constant, au même titre que les bruits et les vibrations émises par le vaisseau spatial (Levine, 1991). Lors d'un vol vers Mars, le vaisseau spatial quitte l'orbite terrestre, un délai variant de 3 à 20 minutes est ainsi nécessaire pour communiquer avec la Terre. L'éloignement de la Terre peut entraîner un stress psychologique augmentant le mal du pays (Sandal et al., 1999).

Malgré ces contraintes, l'espace est aujourd'hui un laboratoire où de nombreuses expériences scientifiques sont réalisées. Dans ces environnements non naturels pour le corps humain, les journées de travail sont conséquentes (10h/jour en semaine) et les astronautes doivent apprendre à vivre et à collaborer efficacement ensemble. Des opérations d'assemblage et de maintenance des composants de la station spatiale et des expériences scientifiques y ont lieu quotidiennement. Ces différentes tâches demandent à l'équipage de se déplacer à l'intérieur du vaisseau spatial. Les astronautes peuvent travailler dans de multiples positions dans l'espace (cf. Figure 4). Or, dans tout environnement il est nécessaire pour l'être humain de

prendre appui sur des références spatiales précises afin de connaître sa position dans l'espace pour interagir avec autrui, exécuter des tâches et planifier des mouvements. Cet ensemble d'actions repose sur des habiletés de *cognition spatiale* et mettent en œuvre diverses représentations et processus mentaux permettant à l'être humain de se représenter et d'interagir dans l'espace (Tommasi & Laeng, 2012).

Sur Terre, la gravité oblige l'Homme à se tenir dans une orientation habituelle qui suit la verticale gravitaire, alors que dans l'ISS, les astronautes peuvent se trouver dans de multiples orientations dans l'espace créant parfois une ambiguïté non négligeable concernant l'identité des surfaces environnantes. Selon les termes employés par un membre de l'équipage du Spacelab : « *La surface que l'on voit sous nos pieds ressemble à un sol* » ; « *Les surfaces parallèles à l'axe de notre corps sont des murs* » et « *Les surfaces au-dessus sont des plafonds* » (Oman, 2003), et cela indépendamment de la position qu'ils occupent dans l'absolu. En d'autres termes, en l'absence de la verticale gravitaire, les astronautes situent l'orientation des objets en fonction de l'orientation de leur propre corps. Admettons que deux astronautes (A et B) soient inclinés l'un par rapport à l'autre. L'individu A peut penser être à la verticale, ici nous parlons de *verticale subjective* telle que ressentie par ce dernier, tandis qu'il aperçoit son collègue (individu B) comme étant incliné à l'horizontale par rapport à lui. Néanmoins, si l'on se place du point de vue de l'individu B, alors ce dernier peut également avoir la sensation de se trouver à la verticale par rapport à l'individu A.

La *verticalité subjective perçue* correspond à un référentiel spatial fondamental utilisé par l'être humain pour élaborer des représentations mentales de la position de son corps et du positionnement des objets dans l'espace (Bonan et al., 2012). Sur Terre, la verticalité subjective coïncide avec la verticalité gravitationnelle, alors qu'en l'absence de forces gravitaires, l'individu doit se fier à sa verticalité subjectivement perçue (Gibson, 1952). Selon Bonan et al. (2012), la verticale subjective est « l'estimation par l'individu de l'orientation de la verticale physique évaluée au travers de l'estimation de l'orientation [...] de son corps à la verticale ». Selon Berthoz, (1997), il s'agit d'un **compromis multi-sensoriel entre les informations visuelles et les informations proprioceptives reçues par le corps**. En situation d'impesanteur, il y aurait une incohérence des informations visuelles émanant de l'environnement par rapport aux perceptions proprioceptives de l'individu qui aboutiraient à une perception instable et ambiguë.

Une expérience sur l'orientation spatiale en impesanteur réalisée avec quatre membres d'équipage lors d'une mission Spacelab a mis en évidence un appui prépondérant sur les signaux visuels et plus réduit sur les signaux somatosensoriels. Après un vol spatial de 10 jours, une dépendance plus forte au champ visuel a été observée pour deux membres d'équipage (Young et al., 1986).

Dans une étude d'IRMf à l'état de repos, une diminution de la connectivité entre le cortex vestibulaire et les régions motrices a été montrée après un vol spatial de 169 jours, ce qui suggère que l'impesanteur entraîne une diminution de la fonctionnalité de l'appareil vestibulaire (Demertzi et al., 2016). Ce réseau vestibulaire cortical est impliqué dans l'intégration des entrées neurosensorielles provenant des systèmes vestibulaires, visuels et proprioceptifs et assure entre autres fonctions, les mouvements, l'orientation spatiale, la perception de la verticale ainsi que le traitement visuel lié aux signaux gravitationnels (Brandt et al., 2005; Lopez et al., 2007, 2009). Au cours d'un test d'inclinaison-translation des otolithes effectué après un vol spatial de 16 jours grâce à une centrifugeuse, Clément et al. (2001) ont également observé une modification de la perception de la verticale avec une différence d'angle de 15° entre la verticale réelle et la verticale subjective perçue par l'astronaute.

Cette perception erronée de la verticale peut avoir des conséquences non négligeables sur la collaboration entre les membres d'équipage (Franklin & Tversky, 1990) et notamment sur les habiletés de *cognition sociale*. Ric et Muller (2017) définissent la cognition sociale comme un domaine d'étude ayant pour objet la pensée humaine et ses relations avec le comportement social. Plus spécifiquement, la cognition sociale renvoie à l'étude des processus par lesquels les individus donnent du sens à eux-mêmes, aux autres, au monde qui les entoure, ainsi qu'aux conséquences de leurs pensées sur le comportement social.

Ce travail de recherche s'intéresse à une aptitude centrale de cognition sociale : la *prise de perspective* (« *perspective-taking* » en anglais). Celle-ci est définie comme l'habileté à regarder une situation d'un point de vue différent de son propre point de vue. Dans ce cas précis, il s'agit d'une *prise de perspective spatiale*. Cependant, elle peut également impliquer l'adoption du point de vue d'une autre personne, ainsi il s'agira d'une *prise de perspective sociale* (*APA Dictionary of Psychology*) (cf. **Figure 4**).

A bord de l'ISS, certaines manœuvres impliquant plusieurs personnes mettent en lumière l'importance de considérer cette habileté de cognition sociale pour garantir le succès d'une mission spatiale. Par exemple, en 1997, lorsque la station spatiale a été réorientée à l'aide de propulseurs sur un vaisseau spatial Soyouz amarré, les astronautes ont rapporté d'importantes difficultés pour visualiser mentalement l'orientation d'un autre membre d'équipage différemment orienté dans le cockpit du Soyouz et pour relayer verbalement les commandes appropriées (Burrough, 1998 ; Oman, 2003). L'aptitude de prise de perspective d'autrui apparaît donc essentielle dans la collaboration et dans les interactions sociales et elle peut être impactée de façon non négligeable en impesanteur.



Figure 4 : Expédition 38 : Rick Mastracchio et Koichi Wakata sont photographiés pendant la préparation de la cargaison Cygnus dans le nœud Harmony de la Station spatiale internationale – NASA Image Gallery

Au-delà de l'étude des effets de l'impesanteur sur le fonctionnement cognitif à bord de l'ISS (Bock et al., 2010; De la Torre, 2014; Sandal, 2001), des modèles développés sur Terre permettent de reproduire certains aspects du vol spatial grâce à des environnements analogues, recréant partiellement les caractéristiques de l'impesanteur. Il s'agit d'environnements expérimentaux spécifiques, que nous détaillerons par la suite, qui permettent de tester également l'efficacité de contre-mesures susceptibles de réduire les effets néfastes de l'impesanteur et de faciliter les conditions de vie des astronautes en orbite ainsi qu'en vue des voyages interplanétaires de demain.

CADRE THÉORIQUE

Les aptitudes de cognition sociale, plus spécifiquement de prise de perspective, reposent sur des référentiels spatiaux spécifiques. Nous allons tout d'abord décrire les référentiels sur lesquels l'individu peut s'appuyer afin d'interagir avec autrui et son environnement. Par la suite, nous aborderons la prise de perspective d'autrui et notamment les conséquences que peut avoir l'absence de gravité sur cette capacité cognitive.

1. Se repérer et se représenter l'espace

1.1. Des cadres de référence gravitaires et visuels

Cette partie illustre l'importance sur Terre de la gravité dans la mise en œuvre des représentations mentales visuo-spatiales et des informations visuelles, en particulier la polarité visuelle (haut/bas) de l'environnement dans ce cadre.

1.1.1. Un cadre de référence gravitaire comme référence verticale

Sur Terre, les capacités spatiales jouent un rôle important dans la vie quotidienne. Elles permettent aux individus de se repérer et de se mouvoir dans des environnements familiers ou inconnus ainsi que de localiser des objets ou des individus et d'interagir avec eux (Colombo et al., 2017). La perception spatiale permet de former une représentation mentale de l'espace environnant grâce à des *cadres de référence*.

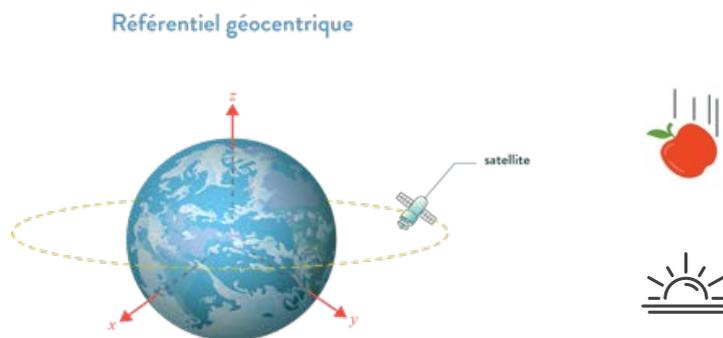


Figure 5 : Illustration du référentiel géocentrique (centré sur la Terre) avec les axes de coordonnées cartésiens tridimensionnels (repères cartésiens). Le référentiel géocentrique fait référence à la gravité terrestre et aux repères environnementaux qui en découlent tels que l'horizon, par exemple.

Ces derniers, construits à partir d'axes de coordonnées spatiaux, verticaux ou horizontaux, permettent de s'orienter dans un espace réel, virtuel ou mental grâce à un système cartésien à trois dimensions (impliquant les axes X, Y et Z) (cf. **Figure 5**) (Berthoz, 1991; Klatzky, 1998; Mintz et al., 2004; Zacks & Michelon, 2005). Ainsi, la construction de représentations visuo-spatiales permet de résoudre des tâches de raisonnement spatial au quotidien notamment des

tâches de navigation spatiale, l'utilisation d'outils à distance, des tâches de coopération entre plusieurs individus, etc.

Ces cadres de référence sont construits sur la base de *référentiels* spécifiques permettant de préciser la position ou l'orientation d'un objet ou de soi-même dans l'environnement (Bringoux, 2018). Sur Terre, l'attraction gravitaire constitue un référentiel dit « *géocentré* » (« centré sur la Terre ») qui s'appuie sur des invariants terrestres tels que la gravité ou l'horizon. Il s'agit ici d'un référentiel constant nous permettant de déterminer l'orientation des objets et de notre propre corps dans l'espace (Paillard, 1991). L'information gravitaire est perçue par le corps, d'une part grâce au système vestibulaire dont les récepteurs présents dans l'oreille interne permettent la perception du mouvement visuel influencé par la gravité (Indovina et al., 2005), les canaux semi-circulaires détectent les rotations du corps dans l'espace (MacNeilage et al., 2010) et les otolithes détectent les modifications d'orientation de la tête et du corps par rapport à la verticale gravitaire (Clément et al., 2001; Tanaka et al., 2017).

D'autre part, l'information gravitaire est perçue par le système somatosensoriel. Celui-ci collecte toutes les informations sensorielles provenant du corps, grâce aux extérocepteurs situés au niveau des organes des sens (œil, oreille, nez, langue, peau) qui sont sensibles aux stimuli provenant de l'environnement, aux intérocepteurs situés dans les viscères et aux propriocepteurs situés sur les os, les cartilages, les articulations, les tendons et les muscles qui renseignent sur la position et sur les mouvements du corps et des membres. Les propriocepteurs permettent de savoir où sont situées les différentes parties du corps sans que l'on ait à les regarder (Howard & Hu, 2001; Mittelstaedt, 1992, 1995). Ainsi, sur Terre, la distribution des pressions gravitaires sur le corps fournit des informations spatiales au système nerveux central (Higashiyama & Koga, 1998; Trousselard et al., 2004).

La gravité est une donnée invariante qui donne une référence spatiale importante sur Terre. Ce référentiel géocentré influence les informations perçues par les systèmes vestibulaires et proprioceptifs qui détectent les mouvements et les sensations corporelles par rapport à la gravité. Par ailleurs, d'autres repères interviennent, notamment les repères visuels soutenant un autre type de cadre de référence : allocentré.

1.1.2. Un cadre de référence allocentré basé sur la vision

Les indices visuels présents dans l'environnement participent à la construction de représentations spatiales grâce à leur position et à leur orientation les uns par rapport aux autres (Colombo et al., 2017). Par exemple, pour accrocher un cadre à un mur et s'assurer qu'il est droit, nous allons aligner celui-ci sur la direction du rebord d'une fenêtre proche ou du pan d'un mur comme élément de référence de la verticale. Il s'agit ici d'un référentiel dit *allocentré*, centré sur des objets extérieurs ou sur l'environnement lui-même, indépendamment de la position de l'individu (Iachini et al., 2009). Ainsi, un individu peut imaginer faire pivoter un objet seul ou le faire pivoter mentalement par rapport à la position d'autres objets présents dans l'environnement afin de le visualiser sous le point de vue souhaité (Keehner et al., 2006).

L'utilisation de représentations mentales de type allocentrées a tout d'abord été étudiée grâce à des tâches d'appariement de figures tridimensionnelles. Shepard & Metzler (1971) ont élaboré un protocole où les sujets déterminaient si deux figures, dont l'une avait subi une rotation entre 0° et 180° étaient identiques ou différentes (cf. **Figure 6**). Cette première étude a permis de mettre en évidence une augmentation constante du temps de réponse avec l'augmentation de l'angle de rotation de l'objet, y compris pour des petites disparités angulaires. Le temps de réponse correspondrait au temps nécessaire pour manipuler mentalement une des figures afin de faire correspondre son orientation à celle de l'autre figure. Selon ces mêmes auteurs, ce processus, appelé « processus de *rotation mentale* », s'effectuerait à un rythme régulier et linéaire : pour un stimulus ayant subi une rotation de 60°, il serait nécessaire d'une seconde pour effectuer la tâche d'appariement. Plus l'angle d'orientation s'agrandit par rapport à la figure originale, plus le temps écoulé pour effectuer cette rotation mentale sera proportionnellement plus long (Shepard & Metzler, 1971)

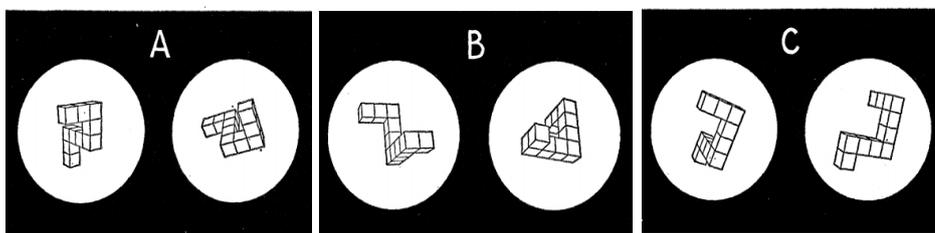


Figure 6 : Protocole de Shepard et Metzler (1971) présentant des paires de figures géométriques et demandant aux sujets de répondre s'il s'agit de la même figure dans des orientations différentes (A/B) ou de figures différentes (C).

Dans un autre protocole, Cooper & Shepard (1973) ont présenté, dans différentes conditions d'étude, des lettres et des chiffres et ont demandé aux participants de déterminer si l'item a subi une simple rotation ou s'il est présenté en miroir. De manière générale, ils observent des temps de réponses plus rapides que dans la tâche de rotation de blocs abstraits en 3D de Shepard & Metzler (1971) qu'ils attribuent à la familiarité des éléments présentés comparativement aux figures tridimensionnelles abstraites. De manière importante, l'augmentation des temps de réponse en fonction du degré d'orientation du stimulus n'est pas linéaire contrairement à l'étude de Shepard & Metzler (1971) (cf. **Figure 7**).

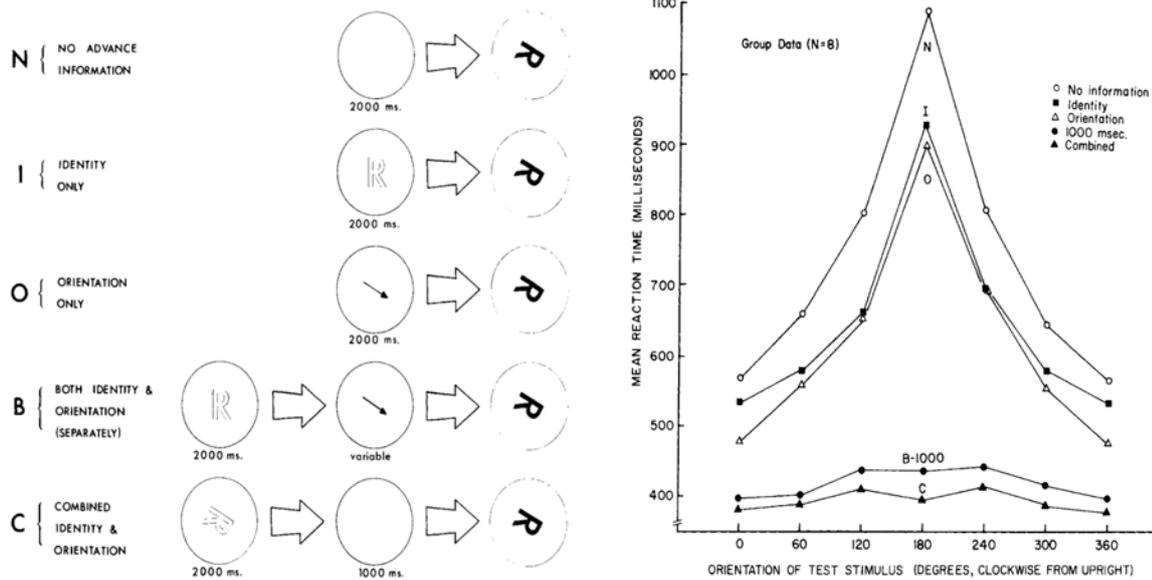


Figure 7 : Graphique issu de l'étude de Cooper & Shepard (1973) représentant les différentes conditions au cours de la tâche de rotation mentale de chiffres et de lettres. Le graphique de droite représente l'évolution des temps de réponses en fonction des différentes conditions de la tâche.

Lorsque des informations précises sont données sur la nature et sur l'orientation de l'item précédant la présentation du stimulus (conditions B et C), les participants répondent plus rapidement quel que soit le degré d'orientation du stimulus. D'après les auteurs, dans ces conditions, une rotation mentale ne serait pas nécessaire, le participant disposant d'un indice préalable sur la nature et l'orientation de l'item, permettant ainsi une décision plus rapide. Au contraire, lorsqu'aucun indice préalable (condition N) ou un seul (conditions I et O) est donné, les temps de réponses augmentent au fur et à mesure jusqu'à 180°. Lorsqu'un stimulus est présenté sans indications préalables, le sujet doit d'abord imaginer le stimulus dans une orientation verticale standard, de sorte que plus l'inclinaison est importante, plus il lui faudra de temps pour effectuer cette rotation mentale (Cooper & Shepard, 1973). Ces résultats peuvent expliquer l'augmentation linéaire des temps de réponses au fur et à mesure de l'augmentation de l'angle de rotation de l'objet dans l'étude de Shepard & Metzler (1971)

puisque la comparaison mentale est plus coûteuse sur le plan cognitif pour des blocs abstraits en 3D (Searle & Hamm, 2017).

La verticale de chaque objet, grâce aux repères visuels haut/bas, permettrait ainsi de définir un point de référence afin de répondre à la tâche d'appariement d'objets en tenant compte de la distance angulaire la plus courte entre l'objet tel qu'il serait à la verticale (0°) et l'item présenté. Ainsi, les repères visuels joueraient un rôle crucial dans les capacités de transformations mentales allocentrées (Berthoz et al., 2008; Foley et al., 2015; Martolini et al., 2020). D'innombrables repères visuels verticaux sont présents dans l'environnement intérieur (murs, rebords de fenêtres, chaises, etc.) mais également extérieur (arbres, murs de bâtiments,...). Si un objet est incliné ou inversé dans l'environnement, une « incompatibilité spatiale » est présente car il existe une incongruence entre l'objet visuellement incliné et les informations gravitaires perçues par le corps, ce qui implique une difficulté à manipuler mentalement cet objet (Rock, 1973 ; Searle & Hamm, 2017).

L'utilisation d'une transformation mentale allocentrée s'appuierait principalement sur des indices visuels présents dans l'environnement. L'individu se réfère à un modèle vertical (haut/bas) aligné avec la verticale gravitaire. Ainsi, plus l'objet est incliné, plus il existe une incongruence entre la verticale gravitaire et la verticale visuelle perçue par le participant ce qui implique des temps de réponses plus importants et donc une difficulté croissante à manipuler mentalement l'objet.

Pour se repérer et se représenter l'espace, il existe ainsi le référentiel géocentré basé sur la gravité terrestre ainsi que les repères visuels présents dans l'environnement. Le paragraphe suivant illustre que les sensations corporelles permettent aussi de construire des représentations mentales, dites « incarnées ».

1.2. Le corps au cœur d'un processus incarné

Selon Berthoz (2010), le corps est également considéré comme un « objet ». Nous allons voir ci-dessous les transformations mentales dites « **égocentrées** » qui s'appuient sur les informations sensorielles provenant du corps, utilisées pour se projeter mentalement d'un autre point de vue, dans une situation donnée.

1.2.1. Le corps comme repère dans les transformations mentales égocentrées

Alternativement aux transformations mentales allocentrées, le **référentiel égocentré** permet de considérer l'emplacement d'un « objet » par rapport au corps de l'individu (Howard, 1982). Une transformation mentale égocentrée implique, non pas d'imaginer la figure tourner comme un objet tel que c'est le cas lors d'une transformation mentale allocentrée mais plutôt de s'imaginer tourner soi-même pour s'aligner mentalement avec l'objet afin de pouvoir prendre le point de vue de celui-ci.

Zacks et al. (2002) ont présenté une tâche de jugement de latéralité où un seul personnage est présenté et le participant doit décider quel bras du personnage est tendu (cf. **Figure 8**). Ces auteurs observent des temps de réponses constants indépendamment de l'angle de rotation du stimulus, contrairement à l'augmentation des temps de réponses au cours de transformations mentales allocentrées lorsque l'angle de rotation du stimulus augmente.

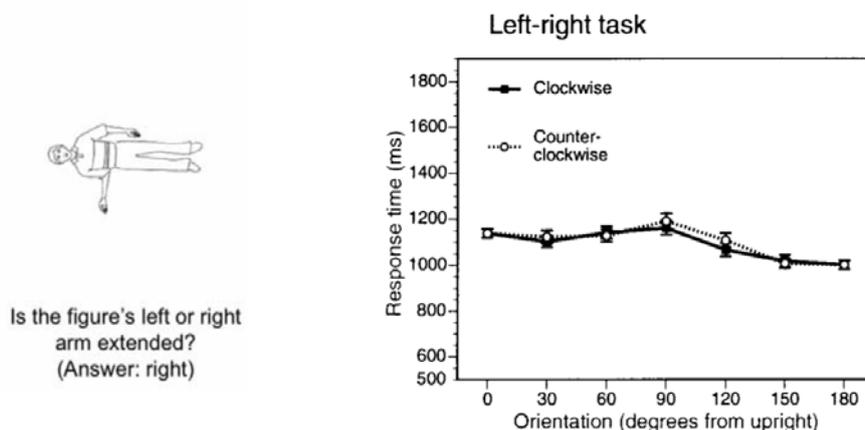


Figure 8 : Expérience 2 tirée de l'article de Zacks et al. (2002) : Présentation d'une seule figure ayant subi une rotation. En l'absence de repère visuel, décider si le bras gauche ou droit est tendu implique des temps de réponses constants indépendamment de l'angle de rotation de la figure suggérant l'utilisation d'un référentiel égocentré.

Zacks et al. (2002) considèrent que l'absence de repère visuel de verticalité amène le participant à se référer à la position de son propre corps en tant que référentiel pour effectuer la tâche et donc à utiliser un cadre de référence égocentré. Dans ce type de transformation mentale, Amorim et al. (2006) proposent que les axes du corps de l'individu sont mentalement projetés sur les axes de l'objet externe, en l'occurrence le personnage dans l'étude de Zacks et al. (2002). Palermo et al. (2014) proposent également que le corps soit projeté dans la mise en œuvre de ces représentations mentales égocentrées. En effet, chez des patients amputés des membres inférieurs, les jugements de latéralité ont été plus lents et moins précis (Nico et al., 2004; Palermo et al., 2014b). De plus, lors d'une tâche où il est demandé aux participants de positionner une partie de leur corps sur une planche en utilisant uniquement la tête comme référence. Les participants amputés réalisent une esquisse désorganisée de leur propre corps en s'appuyant sur un cadre de référence égocentré pour réaliser la tâche. Cette étude montre que la perte d'informations sensorielles affecterait la représentation sensori-motrice du corps, également connue sous le nom de « schéma corporel ». Kammers et al. (2006) ont effectué une stimulation vibratoire d'un tendon du biceps du bras chez des sujets sains ayant les yeux bandés afin d'induire un déplacement illusoire de l'avant-bras. Le système nerveux central reçoit alors des informations contradictoires sur le mouvement et l'emplacement du membre stimulé par rapport aux autres membres qui sont au repos. Cela provoque une illusion kinesthésique, qui montre l'importance de la congruence des informations proprioceptives dans la représentation corporelle permettant de connaître la position du corps dans l'espace. Le schéma corporel repose donc sur les informations proprioceptives reçues par le système nerveux central (Giummarra et al., 2008; Kammers et al., 2006). Plusieurs études de neuroimagerie complètent ces informations en montrant que la jonction temporo-pariétale (JTP) serait activée lors d'expériences imaginaires (expériences hors du corps) et intégrerait les informations provenant également du système vestibulaire (Arzy et al., 2006; Kaski et al., 2016).

Palermo et al. (2014) ne montrent pas de corrélations entre le moment où l'amputation a eu lieu et l'altération des performances, suggérant que l'altération de la représentation corporelle est immédiate. Ehrsson et al. (2004) ont mis en place une illusion perceptive : l'illusion de la main en caoutchouc. Pendant l'expérience, la vraie main du sujet est hors de vue (sous une table) tandis qu'une main en caoutchouc grandeur nature est placée devant le sujet. L'expérimentateur utilise deux petits pinceaux pour caresser la main en caoutchouc et la main cachée du sujet, en synchronisant le moment du brossage aussi précisément que possible. Après environ 10 secondes, la majorité des sujets ont l'impression que la main en caoutchouc est leur propre main et qu'elle détecte les sensations ressenties. Ainsi, la main en caoutchouc est directement attribuée au soi corporel, on parle ici d'*incarnation*. Habacha et al. (2018) ont

montré que la taille des stimuli a également une importance dans une tâche de jugement de latéralité, en effet, les temps de réponse sont plus courts pour les stimuli de grande taille, de 175 cm de haut équivalent à un homme à taille réelle présenté sur un écran de 200x300 face au participant, comparés à des stimuli de petite taille d'environ 35 cm de haut. Sur cet écran de présentation, les stimuli de grande taille permettraient au participant de confronter l'image du personnage à leur propre image corporelle et donc d'effectuer la transformation mentale plus rapidement que pour des stimuli de petite taille.

Le cerveau aurait ainsi besoin d'un modèle du corps (taille, forme, configuration des parties du corps) sur lequel s'appuyer pour interpréter les informations sensorielles et interagir avec l'environnement afin d'obtenir une image corporelle consciente (Fuentes et al., 2013; Gallagher & Cole, 1995). La représentation corporelle sensori-motrice permettrait à l'individu de réaliser des transformations mentales égocentrées lorsqu'il est nécessaire de projeter son propre corps mentalement dans la position d'une autre personne (ou objet) afin de prendre son point de vue.

En résumé, les transformations mentales basées sur les objets dépendent principalement d'indices fournis par le cadre environnemental alors que les transformations mentales égocentrées seraient principalement ancrées sur des indices corporels (Wraga et al., 1999). Lorsque les informations provenant de ces différents systèmes sensoriels (visuels, vestibulaires et somatosensoriels) convergent, elles contribuent à l'élaboration d'une verticale subjective. Celle-ci constitue une estimation de la verticale physique par l'individu (Luyat, 1997). Le paragraphe suivant illustre le rôle de ces systèmes sensoriels lors de la mise en œuvre de transformations mentales égocentrées au cours de tâches expérimentales manipulant le cadre visuel environnemental ou la position corporelle du participant.

1.2.2. Manipulation des systèmes sensoriels lors de tâches de transformations mentales égocentrées en gravité normale

Sur Terre, les informations sensorielles (visuelles, vestibulaires et somatosensorielles) congruentes permettent d'obtenir une stabilité perceptive de l'environnement et ainsi une estimation de la verticale (Howard & Hu, 2001; MacNeilage et al., 2007). La position corporelle dans l'espace par rapport à la direction de la force gravitaire et l'environnement visuel polarisé permet une *auto-orientation perçue* de l'individu qui est mesurée en utilisant la verticale visuelle subjective (« *Subjective Visual Vertical* » SVV). Cette dernière permet de percevoir la qualité verticale ou inclinée des objets, de l'horizon et du monde visuel qui nous entoure.

Howard & Hu (2001) manipulent les indices visuels et corporels perçus par les participants placés dans une pièce, conçue de façon à pouvoir subir une rotation autour d'un axe de roulis de 0° à 360°. Cette pièce cubique similaire à une pièce d'une maison comporte des éléments visuels polarisés : du papier peint, décoré avec des images d'animaux, présent sur les murs, une lampe centrale au plafond et un sol recouvert de moquette. Ainsi, les différents plans de l'espace (murs, plafond et sol) peuvent être différenciés facilement. Un mur comprend la porte et les autres murs présentent des photos, une étagère avec des objets et une horloge murale.

La pièce comporte également deux chaises et une table avec des tasses, ainsi que d'autres objets familiers visuellement polarisés. Tous les objets et mobiliers sont fixés afin qu'ils ne bougent pas lorsque la pièce tourne. Le participant est installé et attaché sur une chaise suspendue à l'extrémité d'une perche dépassant d'un mur de la pièce. Celle-ci est positionnée sur des roulements permettant de l'entraîner en rotation autour de son axe médian horizontal. Le participant peut donc également être tourné autour de l'axe de roulis du corps dans des postures droites, inclinée à gauche ou à droite ou inversée. Les participants doivent indiquer la direction perçue du « bas » grâce à des tiges à positionner à la verticale apparente.

La perception de soi par rapport à la gravité est maintenue lorsque le cadre visuel est droit et le corps également. Lorsque le cadre visuel est incliné, les participants alignent le « bas » avec la direction de leur corps. Au contraire, aucun sujet n'a jugé que « vers le bas » était dans la direction des pieds lorsque le corps est incliné ou inversé et que la pièce était droite. Howard & Hu (2001) ont également montré que la perception du bas est plus fortement déterminée par le référentiel visuel que gravitaire lorsque ces deux référentiels sont en conflit. Le référentiel visuel serait dominant, environ 50% des adultes s'appuieraient davantage sur un cadre de référence visuel fort et ignorent les informations provenant des organes sensoriels gravitaires (vestibulaires et proprioceptifs) lorsqu'elles sont contradictoires. Il s'agit également

d'une disposition individuelle propre à chaque individu, en effet, certains individus appelés « dépendants du champ visuel » se réfèrent davantage aux indices visuels présents dans le cadre environnemental et d'autres individus « indépendants du champ visuel » qui s'appuient principalement sur les informations graviceptives (Viel et al., 2010).

D'après Howard & Hu (2001), le cadre de référence corporel serait susceptible de jouer un rôle plus dominant en impesanteur car il n'y a pas d'informations contradictoires provenant des organes de détection de la gravité (vestibulaire et proprioceptifs) et l'environnement visuel des vaisseaux spatiaux n'est que très faiblement polarisé. Les astronautes perçoivent souvent « le bas » comme étant dans la direction des pieds, il semble que l'axe du corps constitue donc un cadre de référence dominant pour la verticale subjectivement perçue que lorsque la gravité est absente et le cadre visuel appauvri (Howard & Hu, 2001). Preuss et al. (2013) utilisent un dispositif expérimental similaire à Howard & Hu (2001) avec une pièce cubique meublée rotative pouvant pivoter jusqu'à 360° (« *Tumbling Room* »), mais le participant reste dans une position fixe à la verticale (0°). Ces auteurs ont mis en place une tâche de jugement de latéralité comme celle de Zacks et al. (2002) consistant à indiquer quelle main (gauche ou droite) est présentée et ainsi de recourir à un cadre de référence égocentré. Ces auteurs supposent que la représentation mentale de la rotation de sa propre main pour s'aligner sur la main présentée repose sur une représentation incarnée car les taux d'erreurs et les temps de réponse ne variaient pas en fonction de l'inclinaison de la pièce ou des stimuli. En effet, le participant effectuerait une projection des coordonnées de son propre corps sur le stimulus (Amorim et al., 2006), ce qui explique que l'orientation de l'environnement visuel n'a pas d'influence sur les performances dans la tâche. La transformation mentale, dans ce cas, repose sur les informations proprioceptives (Preuss et al., 2013) ; le corps du participant n'étant pas incliné, il reçoit toujours les données gravitaires, vestibulaires et proprioceptives de façon concordante, ce qui lui permet de s'appuyer sur ses sensations corporelles.

Par ailleurs, des études en neuroimagerie cérébrale ont permis de préciser les structures cérébrales impliquées dans ces deux types de référentiels (allocentré et égocentré). Keehner et al. (2006) proposent une tâche consistant pour le participant à décider si une balle positionnée sur une table circulaire se situe à sa gauche ou à sa droite selon une stratégie allocentrée (le participant doit imaginer la table tourner) ou selon une stratégie égocentrée (le participant doit s'imaginer contourner la table pour voir la balle d'un autre point de vue). Ils montrent une activation spécifique du cortex pariétal supérieur bilatéral dans la condition nécessitant une stratégie allocentrée. Des résultats similaires ont été rapportés dans des études antérieures d'imagerie cérébrale au cours de différents protocoles explorant le processus de rotation mentale (Carpenter et al., 1999; Wraga et al., 2005; Zacks et al., 2003).

Une relation linéaire positive est observée entre l'augmentation de l'intensité de la réponse hémodynamique dans ces régions cérébrales parallèlement à l'augmentation des degrés de rotation. Cet effet est susceptible de refléter l'augmentation du coût cognitif au fur et à mesure que l'angle de rotation à réaliser augmente comme dans les études de Zacks et al. (2002) et Shepard & Metzler (1971). Contrairement à ces résultats, la mise en œuvre d'un cadre de référence égocentré au cours d'une tâche de prise de perspective qui consiste à se projeter dans une position différente et imaginaire dans l'espace, montre une diminution de la réponse hémodynamique au niveau du cortex pariétal supérieur droit avec l'augmentation de l'angle de rotation du stimulus (cf. **Figure 9** ; Keehner et al. (2006)). Le cortex pariétal est une région clé qui permet de coder les emplacements des objets par rapport au corps, nous permettant ainsi d'agir sur l'environnement (Denis, 2016). Les régions corticales centrées sur le sillon intrapariétal sont activées lors de la localisation de les cibles dans l'environnement grâce aux coordonnées centrées sur l'œil, la tête, le corps et les membres (Cohen & Andersen, 2002).

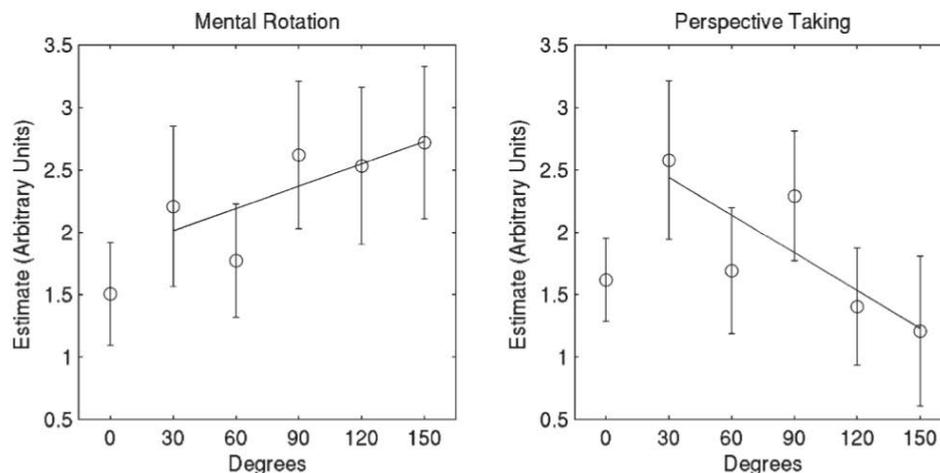


Figure 9 : Analyse de la réponse hémodynamique dans le cortex pariétal droit montrant une relation positive avec les angles de rotation pour la tâche de rotation mentale (allocentré) et une relation négative pour la tâche de prise de perspective (égocentré) (Keehner et al., 2006)

Au cours des transformations mentales allocentrées, il semble plausible que cette région pariétale effectue une fonction de mise à jour en calibrant une nouvelle position imaginée de la balle par rapport au participant, ce qui permet au sujet de décider si elle sera sur son côté gauche ou droit après avoir imaginé la rotation de la table. Ainsi, plus le degré de rotation de la balle depuis sa position de départ est important, plus la mise à jour requise de sa position par rapport aux coordonnées centrées sur le corps sera importante (Keehner et al., 2006).

Au contraire, lors des transformations mentales égocentrées, une diminution linéaire (cf. Figure 9) de l'activation pariétale existerait car l'orientation du corps physique et sa relation avec les objets de l'environnement ne seraient pas pris en compte dans la tâche ce qui rendrait compte d'une performance améliorée si le participant est désorienté avec une connaissance

altérée de la position réelle de son corps (Waller et al., 2002). En d'autres termes, en ignorant ou en supprimant les informations issues de la position réelle dans l'espace de son propre corps, se projeter dans une position différente et imaginaire dans l'espace serait plus aisée. Si le cortex pariétal se trouve impliqué lors de l'encodage en phase initiale de la tâche, son rôle diminuerait ensuite lorsque le participant s'imagine se projeter dans une autre position (Keehner et al., 2006).

Par ailleurs, les stratégies employées au cours d'une tâche de prise de perspective seraient plus variées que dans une tâche de transformation mentale d'objets. En effet, lorsque Keehner et al. (2006) ont interrogé les participants, certains ont déclaré s'être imaginé bouger ou marcher autour de la table, d'autres ont rapporté qu'ils s'imaginaient se repositionner à la pointe de la flèche sans faire le tour de la table et d'autres participants ont décrit un mélange de ces deux stratégies. Ainsi, il convient d'être prudent car les régions cérébrales activées sont susceptibles de dépendre des stratégies utilisées par les participants.

Pour résumer, les transformations mentales égocentrées reposent sur un traitement incarné basé sur le corps et plus spécifiquement sur l'intégration des informations vestibulaires, proprioceptives et gravitaires reçues par le corps. L'orientation de l'environnement visuel n'a pas d'influence sur ces transformations mentales égocentrées tant que l'orientation de l'individu ne varie pas et que ces informations sensorielles restent cohérentes entre elles. En revanche, lorsqu'il n'y a plus d'informations provenant des organes de détection de la gravité (vestibulaires et proprioceptifs) en impesanteur, l'axe du corps constituerait un cadre de référence dominant pour la verticale subjectivement perçue lorsque le cadre visuel est appauvri (Howard & Hu, 2001).

L'ensemble des études citées dans ce chapitre renseignent sur les processus sous-jacents aux transformations mentales d'objets ou de parties du corps d'individus par rapport à l'environnement. Mais qu'en est-il des processus mis en œuvre dans un contexte social lorsqu'un individu doit se mettre à la place d'autrui afin d'imaginer percevoir une situation donnée à partir du point de vue d'autrui ?

Cette question de la prise de perspective d'autrui, ou prise de perspective à la troisième personne, impliquée dans la façon dont nous percevons, traitons et interprétons les informations sociales sera traitée dans le prochain chapitre, en lien avec les processus incarnés (Bertoux, 2016).

2. La prise de perspective sociale

La prise de perspective sociale, appelée « prise de perspective d'autrui » (ou « *prise de perspective à la troisième personne* » - 3PP), intervient dans la prédiction, l'anticipation et l'interprétation du comportement ou dans l'action de nos pairs dans une situation donnée. Au cours d'une situation de communication sociale, comprendre qu'autrui peut percevoir l'environnement différemment que de notre propre point de vue permet de recueillir des informations précieuses concernant son état mental (appelé théorie de l'esprit ; « *Theory of mind* » (ToM)). Il s'agit d'une aptitude cognitive permettant à un individu d'attribuer des états mentaux inobservables (intention, désir, croyance, émotion, etc.) à soi-même et à d'autres individus et d'interpréter les actions d'une autre personne (Apperly, 2012; Frith & Frith, 2012). Voir le monde d'un point de vue différent implique de savoir à quoi ressemblerait une scène dans cette nouvelle perspective. L'individu doit non seulement assumer la perspective imaginée d'une autre personne, mais il doit également ignorer sa perspective réelle, au risque que celle-ci interfère avec sa capacité à générer et à maintenir une perspective projetée (May, 2004; Waller et al., 2002). Il est donc nécessaire de faire appel à des fonctions exécutives telles que des capacités d'inhibition, de flexibilité mentale et de mémoire de travail qui interviennent dans la résolution du conflit entre la perspective de soi et d'autrui (Qureshi et al., 2020).

Selon les théories de la cognition incarnée (« *embodiment* »), des parties du monde, par exemple un objet externe ou le corps d'un autre individu, peuvent parfois être traitées comme si elles faisaient partie de notre propre corps. On parle ainsi de « traitement incarné », comme dans l'étude de Ehrsson et al. (2004) avec l'illusion de la main en caoutchouc, lorsque certaines propriétés d'un élément externe sont traitées de la même manière que les propriétés de son propre corps (de Vignemont, 2011 ; p. 82) (cf. 1.2.2). D'après ces théories, le corps fait ainsi partie intégrante de la cognition et les opérations cognitives seraient fondamentalement ancrées dans le contexte physique (Niedenthal et al., 2005). Ces processus d'incarnation prendraient sens lors des représentations mentales lorsqu'il s'agit de dépasser les frontières physiques en incluant d'autres corps ou objets (Iani, 2021). La notion de « *donner du sens* » (connue sous le terme de « *Sensemaking* » ; cf. **Figure 10**) a émergé en s'appuyant sur celle de la cognition incarnée et s'inscrit dans les contextes sociaux. Cette théorie insiste sur le fait qu'une interaction prend sens dans un contexte spécifique et dépend des indices fournis par le cadre de référence environnemental (Laroche, 1996). Ainsi, l'individu en premier lieu, prend appui sur ses perceptions sensorielles (visuelles, vestibulaires, somatosensorielles) afin de pouvoir donner du sens à une action. Ces tâches de prise de perspective sont caractérisées par une activation à la fois sensorielle et motrice effectuée sur Terre dans un environnement

gravitaire (environnement physique) spécifique. Cette action prend place dans un contexte social : ce qui nous intéresse ici avec la prise de perspective sociale, ou prise de perspective d'autrui.

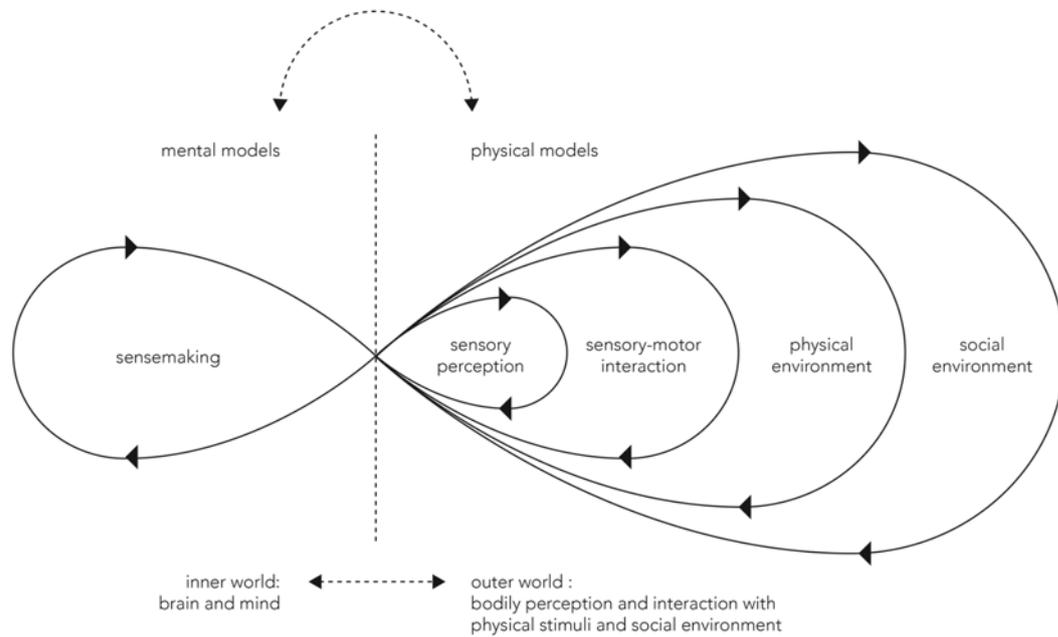


Figure 10 : Modèle de « Sensemaking » s’inscrivant dans les théories de la cognition incarnée (<https://symbioscene.com/embodyed-sensemaking/>) – Modèle adapté des travaux de Dervin (1998) et Weick (1995)

2.1. La prise de perspective d'autrui dans des contextes sociaux

Au début des années 2000, Keysar et al. (2000) s'intéressent à la prise de perspective de deux personnages - le participant et un confédéré, le « directeur » - qui sont assis respectivement devant et derrière une étagère comportant des objets (cf. **Figure 11**). Un des expérimentateurs joue le rôle du directeur qui consiste à guider le participant dans le déplacement des objets sur l'étagère en lui demandant de « déplacer l'objet du haut vers le bas », **en tenant compte du point de vue du directeur**. Ces auteurs ont montré que les participants utilisaient une représentation égocentrée lorsque ces derniers prenaient en compte les éléments occultés depuis le point de vue du directeur sur l'étagère afin de réaliser la tâche.

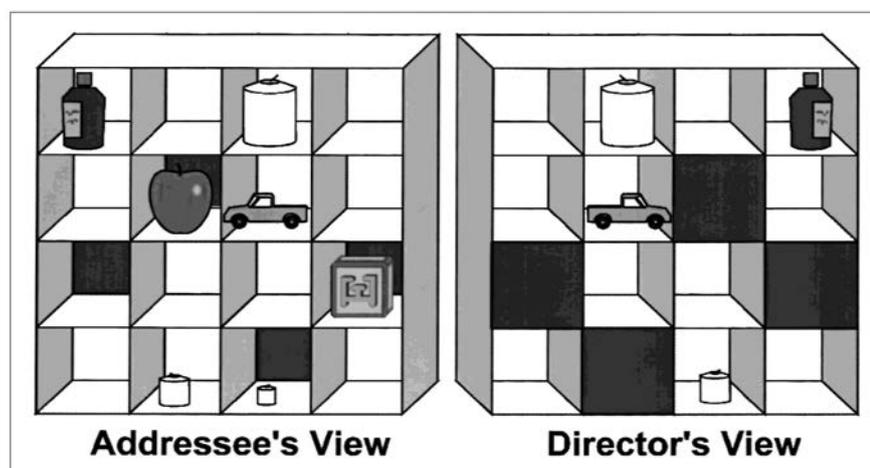


Figure 11 : Expérimentation de Keysar et al. (2000) avec deux vues de l'étagère (Addressee's view = vue depuis le participant vs Director's View : vue depuis le directeur)

Par ailleurs, une tâche proposée par Cavallo et al., (2017) consistait à demander aux participants de signaler la position spatiale gauche/droite d'une cible (une pomme placée sur une table) soit de leur propre point de vue, soit du point de vue d'un avatar qui leur faisait face à l'autre bout de la table. La pomme était soit proche du participant et éloignée de l'avatar, soit proche de l'avatar et éloignée du participant. Dans une condition contrôle, la table a été placée contre un mur (cf. **Figure 12**).

Lorsque les participants adoptent la perspective d'autrui, ils effectuent une transformation mentale égocentrée et se mettent à la place de l'autre personne (l'avatar). Cependant, lorsqu'il s'agit d'un mur face aux participants, ceux-ci avaient des difficultés à se placer mentalement dans le point de vue opposé. Cette étude permet donc de mettre l'accent sur la pertinence de

l'utilisation de l'avatar au cours de tâches de prise de perspective (Böffel & Müsseler, 2019; Cavallo et al., 2017).

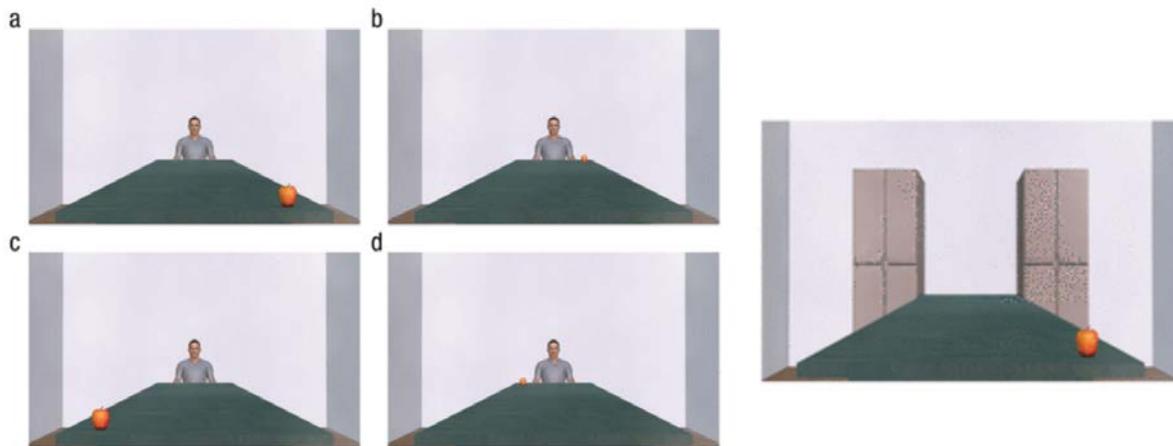


Figure 12 : Tâches expérimentales de l'étude de Cavallo et al., (2017) représentant une scène perçue par le participant au cours d'une tâche de prise de perspective (un avatar est assis à une table face au participant)

Dans une tâche de prise de perspective d'autrui, Gardner et al. (2017) ont utilisé une chaise motorisée sur laquelle le participant est installé et incline activement la tête lors de la rotation passive de tout son corps autour d'un axe vertical. Ces mouvements provoquent une stimulation inhabituelle du système vestibulaire connu sous le nom de « *mouvement de Coriolis* ». Ils ont montré une altération de la prise de perspective d'autrui et non des tâches purement spatiales. L'information vestibulaire permettrait donc de faire la distinction entre le mouvement de soi par rapport à autrui ou par rapport à l'environnement lors des tâches de prise de perspective sociale (Deroualle & Lopez, 2014).

D'après Kiltner et al. (2012), « le sens de l'incarnation envers un corps artificiel est le sens qui émerge lorsque les propriétés de ce corps artificiel sont traitées comme s'il s'agissait de celle de l'individu » (p. 375). Ces expérimentations sont construites dans un environnement dynamique avec des tâches de communication entre individus ou entre le participant et un avatar. La direction de la verticale visuelle, indiquée par des éléments de la scène est déterminante dans ces études de prise de perspective. Il peut s'agir de l'orientation d'un avatar, typiquement à la verticale, mais aussi d'objets présentés dans une scène tels qu'une table (Cavallo et al., 2017), un mur (Baker et al., 2016) ou une étagère (Cane et al., 2017; Dumontheil et al., 2010). L'imagination de la perspective d'autrui implique un déplacement du cadre de référence égocentrique par rapport aux axes du corps de l'observateur (gauche/droite ; haute/bas) (Kozhevnikov & Hegarty, 2001; Wraga et al., 2000).

Ces tâches impliquent la représentation, la mise à jour et l'utilisation de représentations intervenant lorsque les travailleurs utilisent des outils orientés différemment de leurs propres axes perçus. Allen et al., (1996) suggèrent que les tâches de prise de perspective en laboratoire pourraient être un indicateur des capacités spatiales à petite échelle mais également faciliter l'apprentissage de ces habiletés dans un environnement réel.

Afin de simuler ces espaces à grande échelle, des dispositifs immersifs à l'aide de la réalité virtuelle ont été mis en place afin **d'exclure l'utilisation des repères visuels gravitaires** qui sont présents dans des tâches réalisées sur ordinateur, tout en utilisant la profondeur même pour des situations réalistes lors d'une tâche de prise de perspective (Amado et al., 2016; Dumontheil et al., 2010; Loon et al., 2018). L'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle permet la mise en œuvre d'environnements virtuels immersifs (IVE) qui donnent le sentiment au participant d'être littéralement « ailleurs » que là où il se trouve dans le monde physique. Ainsi, les informations visuellement perçues du monde réel sont remplacées par celles issues de l'environnement virtuel. La présentation de scènes en 3D ou en 2D avec profondeur induirait la mise en place de représentations mentales égocentrées alors qu'un affichage simplifié d'un environnement en 2D sans profondeur susciterait plutôt des représentations allocentrées (Mintz et al., 2004).

Ainsi, l'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle (RV) permet aux participants de vivre la scène du point de vue de la troisième personne en incarnant un avatar dans un environnement virtuel. Des recherches ont montré que prendre le point de vue d'autrui en RV peut être une méthode efficace pour promouvoir l'empathie et motiver les comportements pro-sociaux, facilitant davantage les interactions sociales que dans des tâches de prise de perspective dans un environnement pas ou peu immersif (Herrera et al., 2018; Mado et al., 2021). La prise de perspective d'autrui peut être modulée par des traits d'empathie, ainsi dans une tâche où deux perspectives (soi – autrui) étaient soit congruentes ou incongruentes, Mattan et al. (2015) ont montré que des scores d'empathie plus élevés étaient associés à des temps de réponses globalement plus rapides et à une réduction du coût de traitement des perspectives contradictoires ce qui suggère que les participants à forte empathie auraient une plus grande tendance à se plonger dans des simulations montrant finalement des performances supérieures sur ces tâches. Lorsque les traits d'empathie étaient élevés, les participants étaient plus rapides à juger leur propre perspective en présence d'autrui notamment lorsque la perspective est conflictuelle. Mattan et al. (2015) proposent que l'empathie nécessiterait une conscience de soi comme distincte de celle d'autrui ainsi qu'un degré de flexibilité mentale nécessaire pour basculer entre les deux perspectives (Decety & Jackson, 2006).

Une étude préliminaire à celle qui fait l'objet de cette thèse, a permis d'élaborer un protocole sur la base du paradigme de Keysar et al. (2000) et Dumontheil et al. (2010). La tâche développée par Meirhaeghe et Mélan (2016, 2017) représente une scène statique en 2D avec profondeur occupant l'ensemble du champ visuel et faisant apparaître une étagère en son milieu avec 4x4 casiers ainsi que deux personnages fictifs situés respectivement devant et derrière l'étagère (cf. **Figure 13**). L'un des personnages donne l'instruction de déplacer un objet sur l'étagère soit depuis le point de vue du participant, soit depuis le point de vue de l'autre personnage. En conséquence, le participant doit effectuer le mouvement soit de son propre point de vue, soit du point de vue de l'instructeur qui se trouve derrière l'étagère. Dans le premier cas, il s'agit d'une perception directe (0°) ; dans le second cas, le participant doit se projeter mentalement de l'autre côté de l'étagère (180°) impliquant la mise en œuvre d'une transformation mentale égocentrée.

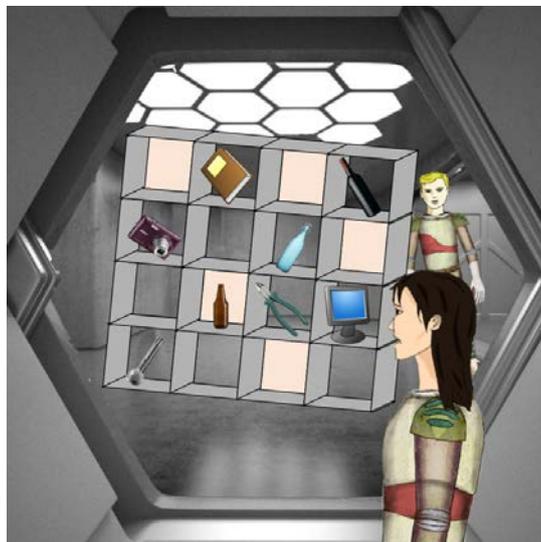


Figure 13 : Tâche expérimentale de prise de perspective de Meirhaeghe et Mélan (2016) représentant deux avatars de part et d'autre d'une étagère sur laquelle se situent des objets. Certains de ces objets se trouvent occultés du point de vue de l'avatar qui se situe derrière l'étagère et non pour le participant, nécessitant ainsi des aptitudes de théorie de l'esprit.

Deux conditions critiques de la tâche impliquent le degré de perspective spatiale (0° ou 180°) et une prise de perspective sociale (ce que le participant perçoit de son point de vue / ce que autrui perçoit de son point de vue). Dans les essais impliquant une prise de perspective sociale, les temps de réponses sont significativement plus élevés que dans les essais impliquant simplement une perception directe.

Des études en imagerie cérébrale ont tenté d'identifier les structures cérébrales activées dans les tâches de prise de perspective d'autrui. Hirai et al. (2020) ont comparé l'activité en spectroscopie proche infrarouge (NIRS : Near InfraRed Spectroscopy) lors d'une tâche de

prise de perspective et lors d'une tâche de rotation mentale chez deux groupes d'enfants âgés de 7 à 11 ans et de 11 à 16 ans. Dans la tâche de prise de perspective, les enfants devaient calculer mentalement la perspective d'un jouet positionné sur un plateau tournant à partir du point de vue d'une poupée placée à un endroit différent de l'enfant. Dans la tâche de rotation mentale, ils devaient uniquement rapporter leur point de vue après que l'objet ait subi une rotation. Au cours de la tâche de rotation mentale, ils observent une hausse des taux d'oxyhémoglobine (HbO) dans le lobe pariétal droit uniquement, dans les deux groupes, comme rapporté lors de transformations mentales allocentrées (Keehner et al., 2006). En revanche, les taux de HbO étaient plus élevés au cours de la tâche de prise de perspective dans la **région temporo-pariétale droite** (régions temporales moyennes et supérieures droites et gyrus angulaire) et dans les **régions frontales** chez les enfants âgés de 7 à 11 ans que chez ceux âgés de 11 à 16 ans. De plus, le groupe d'enfants de 7 à 11 ans a montré des performances (temps de réponses et taux de réponses correctes) inférieures au groupe des enfants plus âgés (Hirai et al., 2020).

Martin et al. (2020) ont proposé une tâche représentant une table sur laquelle sont disposés quatre disques gris et un panneau occultant ainsi qu'un avatar assis autour de la table à l'un des six emplacements possibles (60°, 110° ou 160°), sur la gauche ou la droite du regard du participant (cf. **Figure 14**). Dans la condition de prise de perspective à la première personne, le participant indique si le disque est visible pour l'avatar (oui/non) et dans la condition de prise de perspective à la troisième personne, le participant indique si le disque se situe à la gauche ou à la droite de l'avatar. Afin de manipuler le traitement incarné, la position du participant lui-même a été manipulée pour être congruente ou incongruente avec le positionnement de l'avatar autour de la table. Martin et al., 2020) ont montré qu'une augmentation des réponses correctes dans la condition de prise de perspective à la troisième personne est associée à une activation de la jonction temporo-pariétale droite.

Mitchell (2008) a également montré que les tâches mettant en œuvre des capacités de théorie de l'esprit mais aussi des tâches d'orientation attentionnelle activent une zone de la TPJ. Ces tâches demandent une réorientation de l'attention vers une direction ou un point pertinent. Dumontheil et al. (2010) ont, au contraire, montré que la TPJ n'était pas activée lors d'une tâche de prise de perspective d'autrui dans le paradigme du directeur. En revanche, une activation du précuneus a été observée dans cette étude dans la tâche de prise de perspective d'autrui (Dumontheil et al., 2010). Les auteurs proposent que la TPJ n'interviendrait pas de façon isolée lors de la réalisation de tâches de cognition sociale mais ferait partie d'un réseau plus important sollicité lors de la réalisation de transformations de perspective incarnées (Seymour et al., 2018; Wang et al., 2016). En effet, Seymour et al. (2018) ont rapporté que

des temps de réponse plus longs lors d'une augmentation de l'angle entre soi et la perspective d'autrui sont accompagnés d'une augmentation de la puissance thêta dans la rTPJ, le cortex préfrontal latéral droit ainsi que le cortex cingulaire antérieur (ACC) droit.

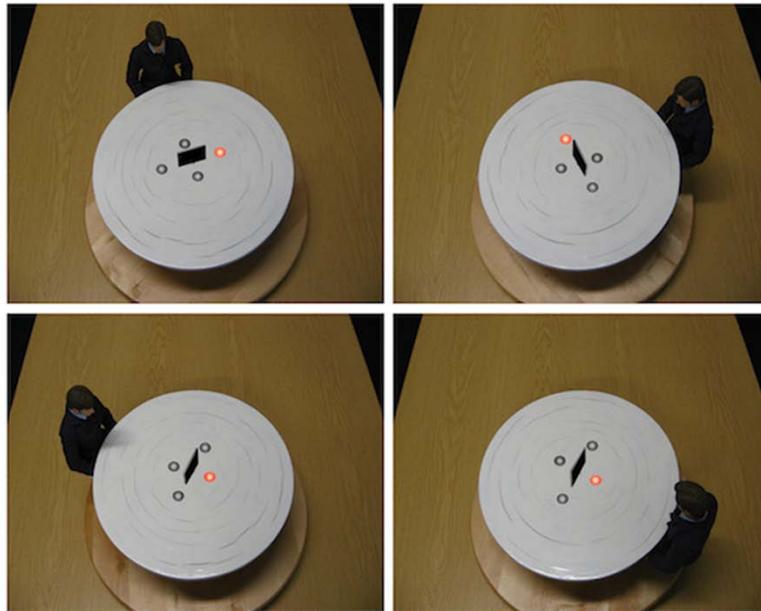


Figure 14 : Expérience de Martin et al. (2020) nécessitant une prise de perspective à la première personne ou à la troisième personne.

Ces deux dernières régions, situées dans le lobe frontal du cerveau, exerceraient une influence descendante sur la région rTPJ, indiquant qu'un contrôle exécutif serait nécessaire à la gestion des conflits entre soi et les autres perspectives. De plus, le cortex cingulaire postérieur (PCC), situé dans la partie médiale du lobe pariétal inférieur, montre une connectivité fonctionnelle avec d'autres parties corticales, en particulier avec le cortex préfrontal (Leech & Sharp, 2014). Ces activations pariétales et préfrontales permettraient d'intégrer les informations sensorielles afin d'en déduire une conscience corporelle et ainsi une représentation de notre corps (Popa et al., 2019; Salehinejad et al., 2021).

La prise de perspective d'autrui dans une tâche expérimentale serait associée à une activation corticale dans les mêmes régions que lors des transformations mentales égocentrées mais avec des différences en fonction de l'âge des enfants. Les différences d'activation cérébrale et de performance pourraient s'expliquer par le développement du schéma corporel qui s'achève vers l'âge de 12 ans. Matar Touma (2021) a montré que la structure de dessins de bonhommes chez des enfants âgés de 6 à 12 ans se rapproche du schéma corporel adulte à partir de l'âge de 9 ans. Avant cet âge, les structures temporales et pariétales seraient activées lors de tâches de prise de perspective à la troisième personne en raison de l'effort mental

supplémentaire nécessaire pour prendre la perspective d'une autre personne alors que la représentation mentale du corps n'est pas concrètement déterminée. Lorsque cette dernière est stable à l'âge de l'adolescence, ils auraient moins de difficultés à se projeter mentalement à la place d'autrui.

Les aptitudes de prise de perspective sociale interviennent au cours de situations de travail impliquant plusieurs individus. Prendre le point de vue d'autrui nécessite de se référer à un cadre égocentré prenant appui sur notre propre corps. De nombreuses études expérimentales ont exploré la façon dont l'individu interagit avec autrui dans des dispositifs en réalité virtuelle via des scènes en 2D ou 3D mettant en scène un avatar et permettant d'exclure l'utilisation de repères visuels gravitaires. Cependant, la gravité physique demeure dans ces situations expérimentales.

Les transformations mentales égocentrées qui sous-tendent la prise de perspective d'autrui seraient soutenues par les structures temporo-pariétales, avec une activation latéralisée à droite et cela plus particulièrement au cours du développement. D'autres processus cognitifs non-sociaux seraient sollicités dans les tâches de prise de perspective d'autrui en particulier des fonctions exécutives et des processus attentionnels qui seront décrits ci-dessous.

2.2. Processus non-sociaux impliqués dans la prise de perspective

Porter un jugement explicite sur ce qu'autrui voit, c'est-à-dire prendre son point de vue, nécessiterait des aptitudes de raisonnement social mettant en jeu différentes fonctions exécutives. Il s'agit de l'inhibition de sa propre perspective et des informations non pertinentes, de l'orientation de l'attention sur les éléments pertinents de l'environnement, de la manipulation en mémoire de travail des représentations mentales d'autrui en lien avec les connaissances stockées en mémoire à long terme et la mise à jour de la mémoire de travail (Samson et al., 2010, 2012).

Ces processus ont été mis en évidence dans une tâche qui consistait pour le participant à vérifier le nombre de disques apparaissant sur les murs d'une salle en 3D (cf. **Figure 15**, Samson et al., 2010), soit à partir de leur propre perspective visuelle soit à partir de celle d'un avatar qui était identique ou différente de celle du participant. Lorsqu'un nombre différent de disques pouvait être vu depuis les deux points de vue, les participants avaient des difficultés à ignorer la perspective non pertinente, telle qu'en témoigne une augmentation des temps de réponse. D'autres études ont également montré des temps de réponses plus lents lorsqu'il existe une ambiguïté entre les perspectives du participant et celle d'un avatar (Cane et al., 2017; Keysar et al., 2003; Lin et al., 2010).

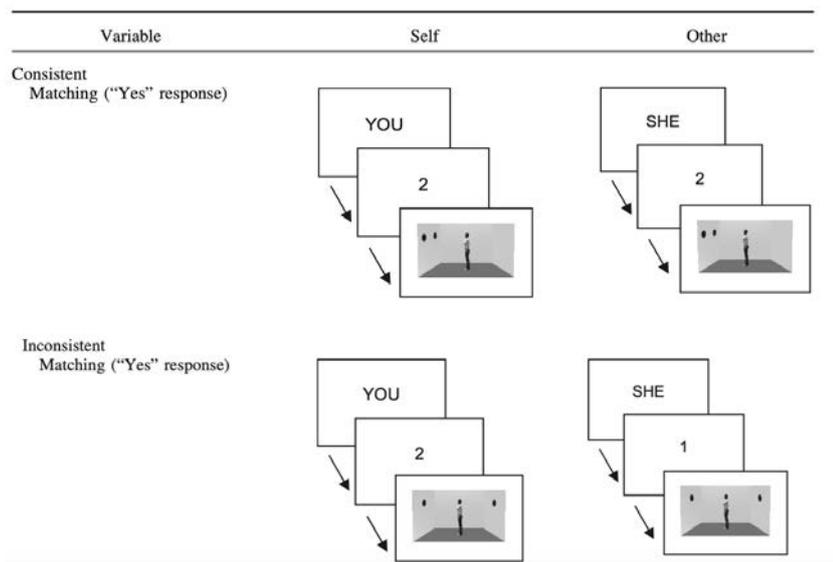


Figure 15 : Expérience de Samson et al. (2010) : Variable 1 : Consistant : Points de vue différents avec réponses identiques ; Variable 2 : Inconsistant : Points de vue différents avec réponses différentes, selon le point de vue de soi ou avatar, la réponse à la tâche n'est pas la même, par exemple, dans la condition inconsistant l'avatar ne voit qu'un seul disque par contre le participant voit deux disques.

Ces interférences seraient les plus importantes lorsqu'il s'agit de basculer de la perspective de soi vers celle d'autrui (Samson et al., 2010) en raison d'une tendance spontanée avérée à prendre son propre point de vue (biais égocentrique) même lorsque le point de vue à adopter est celui de l'avatar. Surmonter ce biais serait davantage exigeant sur le plan cognitif, Samson et al. (2010) ont montré que les participants sont beaucoup plus rapides à juger le point de vue d'autrui que leur propre point de vue qu'ils soient congruents ou incongruents. Cette constatation suggère qu'adopter le point de vue d'autrui est moins exigeant sur le plan cognitif et donc moins dépendant d'un contrôle descendant que la sélection de son propre point de vue.

Ramsey et al. (2013) ont reproduit l'expérience de Samson et al. (2010) en introduisant des mesures en IRMf afin d'observer les différences d'activations corticales lorsque les perspectives sont congruentes ou incongruentes. Ces auteurs montrent qu'il existe une zone commune notamment fronto-pariétale, aux perspectives de soi et d'autrui. Le cortex pariétal viendrait soutenir le lobe frontal dans l'exécution de mécanismes inhibiteurs. En l'absence de conflit entre les deux perspectives, l'engagement fronto-pariétal serait réduit nécessitant moins de contrôle cognitif pour réaliser la tâche. Ainsi, les régions fronto-pariétales seraient davantage sollicitées pour juger de la perspective de soi plutôt que de celle d'autrui. Ces auteurs proposent, comme Samson et al. (2010) que nous calculons automatiquement ce que les autres voient, avant même d'être explicitement conscients de notre propre point de vue.

Ferguson et al. (2017), qui ont enregistré les mouvements oculaires au cours d'une tâche similaire ont constaté des fixations oculaires plus longues sur l'avatar lorsque les deux points de vue sont incongruents, dans ce cas les participants passaient plus de temps à regarder l'avatar lors de l'adoption de la perspective à la troisième personne. Purcell et al. (2022) ont montré que l'incertitude d'une réponse pouvait être déduite avec des mesures de suivi oculaire. En effet, une proportion plus faible de fixations oculaires et une insistance (temps de fixation cumulé) sur un élément visuel indiquerait une plus grande prise en compte des réponses alternatives pendant le raisonnement et par conséquent une plus grande incertitude dans la réponse, c'est-à-dire une concurrence entre deux ou plusieurs solutions. Les fixations permettent de déterminer quelles informations une personne prend en compte (Ball et al., 2006) et le temps de fixation est examiné pour évaluer la profondeur avec laquelle cette information est traitée (Glöckner & Herbold, 2010). Ferguson et al. (2017) ont également montré que les performances étaient moins bonnes lorsque les deux points de vue étaient incongruents, montrant l'existence d'un conflit entre la perspective de soi et celle d'autrui.

Les fonctions exécutives sont nécessaires pour résoudre le conflit entre la perspective de soi et celle d'autrui. Qureshi et al. (2020) ont montré que la stimulation du cortex préfrontal dorso-latéral lors d'une tâche de prise de perspective où la perspective de soi et d'autrui étaient incohérentes altérait la résolution du conflit entre la perspective de soi et celle d'autrui. De plus, Qureshi et al. (2010) ont mis en place une tâche de prise de perspective et une tâche exécutive secondaire (tâche de tapping) en exécution simultanée. Les résultats de cette étude suggèrent que la tâche secondaire n'a pas affecté le calcul de la perspective mais uniquement la sélection de la perspective pertinente et ce d'autant plus lorsque celles-ci sont incongruentes (Qureshi et al., 2010) Ces auteurs ont également montré que les participants continuent à effectuer un calcul non pertinent de la perspective de l'avatar sur les essais portant sur la perspective de soi malgré l'exécution simultanée de la tâche exécutive. Le calcul de la perspective liée à l'avatar serait un processus cognitivement efficace qui demande relativement peu de fonctions exécutives.

De plus, Wardlow (2013) a montré que les capacités de rétention en mémoire de travail (empan mnésique – WAIS III) influence la prise de perspective, en effectuant des corrélations entre les performances obtenues aux deux tests. Elle déduit que l'identification de chaque objet de l'environnement nécessite que le locuteur stocke l'identité de chacun des objets pertinents en mémoire de travail. Le stockage en mémoire permet au locuteur de comparer les caractéristiques distinctives des objets avec les éléments pertinents de l'environnement.

Apperly & Butterfill (2009) ont défini un système de mentalisation à deux voies. D'une part, une composante implicite et automatique, relativement flexible, qui joue un rôle dans les interactions et la communication compétitive et stratégique et permettrait de réagir rapidement sans nécessiter d'importantes ressources cognitives. D'autre part, une composante explicite, plus exigeante sur le plan cognitif, qui intervient lorsque la tâche de prise de perspective exige un niveau plus important de représentation, avec la mise en œuvre de la mémoire de travail et des composantes exécutives. Cette composante explicite soutient l'explication et la prédiction de l'action impliquée dans la négociation, la conscience de soi et la compréhension des relations avec autrui (Apperly & Butterfill, 2009; Schneider et al., 2012).

Ce système est à mettre en lien avec le modèle anatomo-fonctionnel de la théorie de l'esprit proposé par Abu-Akel & Shamay-Tsoory (2011), qui propose un réseau cortical impliqué dans le traitement et la représentation des états mentaux de soi et d'autrui. D'après ce modèle, la distinction entre soi et autrui s'effectuerait via la jonction temporo-pariétale, puis l'information serait transmise au cortex temporal (STS - sulcus temporal supérieur) impliqué dans la prise en compte d'autrui. Deux boucles interconnectées assureraient ensuite les versants affectifs et cognitifs de la théorie de l'esprit. La prise de perspective d'autrui repose sur le versant cognitif et impliquerait le cortex cingulaire antérieur (frontal) et le pôle temporal qui engageraient ou désengageraient les différents systèmes attentionnels. Ces structures corticales font le relai avec le cortex préfrontal dorsal qui sert à exécuter ces représentations mentales d'autrui et à distinguer la perspective de soi et celle d'autrui (cf. **Figure 16**).

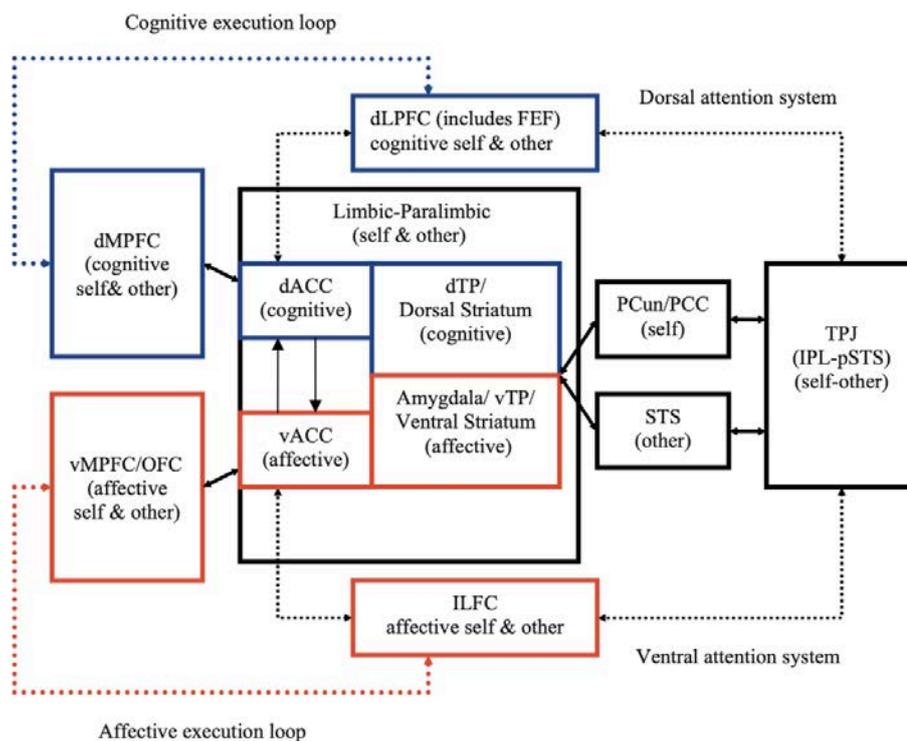


Figure 16 : Modèle de Abu-Akel & Shamay-Tsoory (2011)

Des composantes exécutives sous-tendent les habiletés de prise de perspective et une activation de la jonction temporo-pariétale droite est impliquée dans le contrôle inhibiteur ainsi que dans les tâches de réorientation attentionnelle. L'activité de cette région corticale est influencée par les zones préfrontales et frontales suggérant qu'un contrôle exécutif est nécessaire à la gestion des conflits entre les perspectives de soi et d'autrui.

Ces habiletés de prise de perspective reposent sur la congruence des informations sensorielles reçues par l'environnement et par le corps : vision, vestibulaire et proprioceptif.

Qu'en est-il des capacités à prendre la perspective d'autrui lors de situations extrêmes où la gravité ne constitue plus un référentiel sur lequel prendre appui et où les indices sensoriels vestibulaires et/ou proprioceptifs sont compromis ?

3. Environnements extrêmes et prise de perspective d'autrui

3.1. Des modèles terrestres de simulation de l'impesanteur

3.1.1. Le vol parabolique

Depuis les années 1950, des vols paraboliques réalisés à bord d'un avion dans un but scientifique permettent de recueillir des données sur la physiologie et sur la psychologie de l'être humain en condition de brèves périodes répétées d'impesanteur. Les vols paraboliques permettent également aux astronautes de se familiariser avec la sensation, le déplacement et les mouvements en impesanteur.

En France, le 1^{er} vol parabolique est réalisé en 1946 par la Direction générale de l'armement avec un avion bimoteur à hélice, un Martinet. En 1989, une filiale du CNES, Novespace, initie la 1^{ère} campagne de vols paraboliques pour la recherche scientifique. Les vols se déroulent au large des côtes françaises, au-dessus de l'Atlantique ou au-dessus de la Méditerranée, à environ 6000 m d'altitude dans des zones aériennes spécifiques où ont habituellement lieu des essais en vol. Dans ces zones, le trafic aérien n'est pas dense et un contrôleur aérien est dédié à assurer le contrôle du vol. La technique appelée « manœuvre parabolique » (cf. **Figure 17**), alternant des phases de montées et de descentes espacées en palier, permet de reproduire de courtes périodes d'impesanteur. Contrairement aux vols commerciaux, dans l'avion 0g aucun système de pilote automatique de vol n'est enclenché ; il est manœuvré simultanément par trois pilotes expérimentés qui contrôlent respectivement le tangage de l'avion, le roulis et le régime des moteurs pendant la manœuvre.

La manœuvre parabolique se divise en trois phases qui se succèdent :

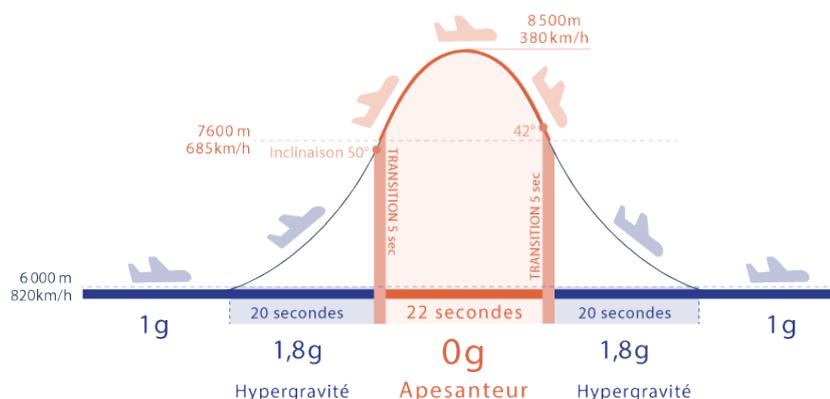


Figure 17 : Manœuvre parabolique (3 phases : Hypergravité /Impesanteur/ Hypergravité).
Source : www.airzerog.com

- **Phase d'hypergravité** (20 secondes) : Le pilote cabre l'avion jusqu'à atteindre un angle de 50° par rapport à l'horizontale. La pesanteur alors ressentie dans l'avion augmente jusqu'à 1,8 fois le niveau de pesanteur terrestre (1g).
- **Phase d'impesanteur** (22 secondes) : Alors que l'avion est en pleine ascension, le pilote réduit le régime des moteurs et place l'appareil dans sa trajectoire balistique, l'avion entre alors en gravité zéro (0g) et décrit une parabole au cours de laquelle il est en chute libre.
- **Phase d'hypergravité** (20 secondes) : Enfin, alors que l'avion est en piqué avec une assiette à 42°, l'équipage redresse progressivement l'appareil tout en augmentant le régime des moteurs. Les passagers pèsent de nouveau 1,8 fois leur poids terrestre. Après 20 secondes, l'avion retrouve une trajectoire horizontale en gravité normale pendant une à deux minutes avant le début de la manœuvre suivante.

Lors de l'exposition aux phases d'impesanteur simulée en vol parabolique, les otolithes de l'oreille interne (cristaux) sont sensibles aux modifications de gravité (gravité standard, impesanteur, hypergravité) (Shelhamer, 2016). Les otolithes du système vestibulaire détectent une forte perturbation lors de l'entrée en impesanteur, cependant, la suppression de la gravité ne désactive pas complètement ce système qui continue à ressentir les mouvements linéaires impliquant les mouvements de la tête, par exemple. En revanche, lorsqu'on maintient une posture verticale avec la tête quasiment immobile, le système otolithique n'est pas activé et ne fournit plus d'informations sur la verticale gravitaire. En impesanteur, l'individu est ainsi privé sélectivement des informations spatiales d'orientation d'origine vestibulaire (Chabeauti P.Y., 2012). Lorsque les signaux vestibulaires statiques sont difficiles à interpréter en raison de l'absence d'un vecteur g constant, d'autres informations sensorielles joueraient un rôle plus important dans la fourniture d'informations d'orientation (visuels ou somatosensoriels). Il y a, par exemple, une altération de la perception de l'orientation du corps en 0g mais une récupération de la sensation « vers le bas » lorsque des signaux de toucher et de pression sont présents (Cheung et al., 1990; Lackner, 1992). Un déplacement des fluides vers le haut du corps est également observé au cours du vol parabolique (Bailliart et al., 1998; Mukai et al., 1991) mais d'effets moindres en raison des différentes phases du vol et des durées limitées en impesanteur.

Lopez et al. (2008) ont exposé des sujets sains à une situation de stimulation calorique et galvanique de l'oreille interne. Ils ont montré que le traitement de soi est perturbé lorsque le système vestibulaire est stimulé. De plus, chez des patients ayant des lésions au niveau de la jonction temporo-pariétale et des zones corticales vestibulaires, ils ont montré que la propriété corporelle, le fait de considérer son propre corps comme appartenant à soi, est altérée.

Stahn et al. (2020) ont testé les effets de différents niveaux de gravité (1g, 0g, 2g) sur les performances de mise à jour spatiale chez dix participants sains au cours d'un vol parabolique. La mise à jour spatiale nécessite de mémoriser des représentations d'objets égocentriques. Celle-ci a été évaluée par une tâche 3D virtuelle qui demandait aux participants d'encoder l'identité et l'emplacement des objets, de mémoriser puis de mettre à jour les coordonnées de l'objet égocentrique lors d'un mouvement vers l'avant. L'utilisation de différentes longueurs du mouvement de translation (25 m ou 45 m pour les essais de mise à jour courts et longs, respectivement) a fourni une variation dans la complexité de la mise à jour. Stahn et al. (2020) ont montré une augmentation des erreurs dans les essais longs de mise à jour en 0g et 1,8g (hypergravité). Ces résultats suggèrent la nécessité d'un recours plus important à la mémoire de travail plus élevé ainsi qu'un traitement attentionnel plus important. Cette étude montre que les performances cognitives ne sont pas uniquement altérées par la situation de 0g mais peuvent aussi être altérées par les phases d'hypergravité en vol parabolique. De plus, Steinberg et al. (2015) ont mis en place une tâche en réalité virtuelle qui comporte un scénario réel complexe : le contrôle d'une centrale nucléaire. Ils demandent aux participants de maximiser leurs gains entre la production d'électricité demandée et celle produite en temps réel afin de recueillir le plus de bénéfices possibles. Les résultats montrent que l'effort physique perçu ainsi que les taux de cortisol augmentent lors des phases de 0g tandis que l'effort psychologique, l'état de motivation et la charge de travail n'ont pas été affectés au cours des phases de 0g en vol parabolique. Ces auteurs concluent que seul le stress physique est élevé en 0g car davantage de ressources doivent être allouées au système moteur pour contrer les effets de l'impesanteur simulée.

Friedl-Werner et al. (2021) ont évalué le niveau de vigilance, d'attention sélective et soutenue lors des phases de 0g et 1g en vol parabolique, à l'aide d'une tâche de Go/No-Go. Une détérioration du traitement attentionnel est mise en évidence avant la première parabole en 0g, s'aggrave tout au long du vol puis revient à la ligne de base après la dernière parabole. Les résultats ont montré que les temps de réaction et le taux de fausses alarmes sont modérément corrélés avec l'état d'anxiété auto-déclaré par le participant mais non avec les niveaux de cortisol ou les états émotionnels. L'utilisation de la scopolamine a eu des effets mineurs sur le temps de réaction. D'autres paramètres peuvent affecter le traitement attentionnel tels que la qualité du sommeil avant le jour du vol, le niveau de stress des participants ainsi que l'humeur et l'état d'anxiété. En effet, un niveau d'anxiété plus élevé était modérément associé à un temps de réaction plus lent et à un taux de succès plus faible ainsi qu'à un taux de fausses alarmes plus élevé.

3.1.2. Le Head-Down Bed-Rest (HDBR)

Le modèle de simulation d'impesanteur Head-down Bed-rest, qui signifie littéralement « alitement tête vers le bas » est utilisé notamment en médecine spatiale (cf. **Figure 18**). La réduction de l'activité physique et les sollicitations gravitationnelles induites sur le corps par son léger basculement en continu vers le bas simulent, partiellement et après de longues périodes, les conséquences physiologiques rencontrées en impesanteur ou lors d'un vol spatial (Pavy-Le Traon et al., 2007).

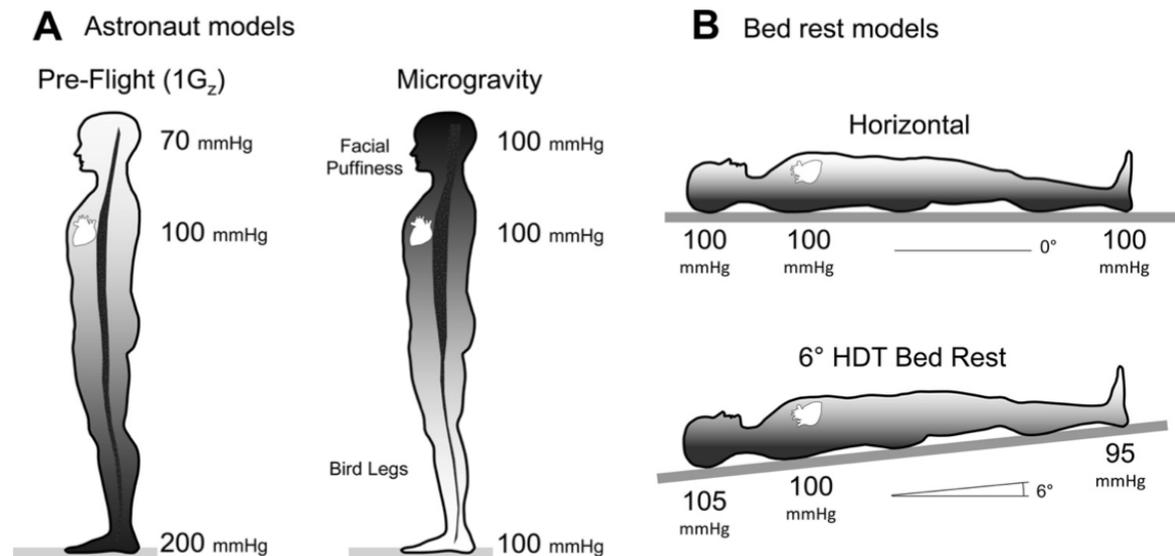


Figure 18 : Illustration comparative entre modèles en vol spatial (A) et modèles en bed-rest (alitement standard vs alitement en Bed-rest (-6° d'inclinaison) (Hargens & Vico, 2016)

En effet, lorsqu'un individu est en décubitus dorsal tête en bas (6°) pendant une période prolongée, les fluides corporels sont déplacés vers le haut du corps, comme ce qui se produit en vol spatial. Une capacité d'effort réduite est observée à la fin d'un alitement prolongé de 42 jours de bed-rest. Le poids corporel est réduit de 2 à 4%, la masse musculaire et la force musculaire sont également réduites. La densité osseuse, la raideur des os des membres inférieurs et de la moelle épinière sont diminués (Pavy-Le Traon et al., 2007).

En HDBR, la modification de la posture et la perte de pression sur la plante des pieds entraineraient une adaptation du système nerveux central dans la prise en compte des entrées sensorielles (Yuan et al., 2018). Un poids moins important serait accordé aux entrées sensorielles véhiculant les informations les moins fiables afin de limiter leur influence (sous-pondération), tandis que le poids accordé aux autres entrées disponibles serait alors augmenté (sur-pondération). Ainsi, une réduction des entrées somatosensorielles entraînait

une augmentation de la sensibilité en particulier aux entrées vestibulaires (Kheradmand et al., 2015), impliquant une réadaptation multi-sensorielle (Blumle et al., 2006; Carriot et al., 2015; Cenciarini et Peterka, 2006; Jeka et al., 2008; Mergner et al., 2005).

En HDBR, les charges musculaires statiques et dynamiques sont réduites, les fluides corporels sont redistribués et la charge d'appui de la surface réceptrice des pieds est supprimée (Kozlovskaya et al., 2007). Après 70 jours de HDBR, Cassady et al. (2016) montrent une réduction de la connectivité au repos dans les zones motrices, somatosensorielles et vestibulaires du cerveau et Koppelmans et al. (2017) observent une augmentation de la matière grise dans les zones pariétales postérieures et une diminution dans les zones frontales. Tomilovskaya et al. (2019) suggèrent que les effets de changements cardiovasculaires, posturaux et neuromusculaires au cours de 21 jours de HDBR et de trois jours d'immersion sèche sont similaires. L'immersion sèche serait donc un modèle accéléré par rapport au HDBR.

Cassady et al. (2016) montrent qu'au cours de 70 jours de HDBR, la connectivité cérébrale au repos augmente au niveau des zones corticales motrices et somatosensorielles et qu'elle diminue à nouveau lors de la période de récupération après la période de HDBR. Une connectivité fonctionnelle accrue a également été observée dans la jonction temporo-pariétale droite impliquée dans l'intégration des entrées vestibulaires avec des informations somatosensorielles (Lopez et al., 2009). Il pourrait s'agir d'une stratégie employée par le système nerveux central pour compenser des changements induits par le HDBR. Des expériences comportementales suggèrent également que la fonction vestibulaire est altérée en HDBR. Maçaulay et al. (2016) ont montré une réduction de 31% de la stabilité de l'équilibre après 30 jours d'alitement en bed-rest. Par conséquent, l'orientation et l'équilibre pourraient être affectés lors de la mise en place d'un nouvel équilibre sensoriel durant l'HDBR.

3.1.3. L'immersion sèche

Le modèle d'immersion sèche (« *dry immersion* ») a été mis au point et utilisé dans un premier temps par les scientifiques russes (cf. **Figure 19**). Cette technique consiste à immerger le sujet dans une eau thermoneutre recouverte d'un tissu élastique imperméable à l'exception de la tête et des bras. Le sujet est en suspension libre dans la masse d'eau mais reste au sec (Robin et al., 2020).



Figure 19 : Méthode d'Immersion sèche (Dry Immersion) - MEDES Clinique Spatiale Toulouse (Hôpital de Rangueil), structure créée par le CHU de Toulouse en collaboration avec le CNES (Centre National des Etudes Spatiales)

L'atout le plus important de l'immersion sèche est l'absence de support : l'appui étant réparti de manière égale sur toute la surface corporelle, l'organisme humain l'interprète comme une absence complète d'appui, tout comme c'est le cas en impesanteur.

Les entrées somesthésiques sont perturbées en raison d'une réduction des charges gravimétriques sur les articulations et des pressions égalisées sur tout le corps. L'atteinte proprioceptive est observée après quelques heures seulement en immersion, avec un pic après 3 à 7 jours d'immersion (Kozlovskaja, 2008; Navasiolava et al., 2011). Au même titre que le Bed-rest, l'immersion sèche est un modèle au sol efficace pour reproduire et étudier la plupart des effets de l'impesanteur y compris l'inactivité physique du fait d'une diminution des mouvements, d'un allègement ressenti de la charge corporelle et de la pression de l'eau (Navasiolava et al., 2011; Tomilovskaya et al., 2019). Les effets sur le transfert des fluides (des jambes vers la poitrine) sont plus prononcés et rapides avec l'immersion sèche comparativement au bed rest (Coupé et al., 2013; Navasiolava et al., 2011). La tolérance orthostatique diminue considérablement (De Abreu et al., 2017; Navasiolava et al., 2011). L'hypovolémie (la diminution du volume sanguin) atteint 15 à 17 %, similaire à celle observée en microgravité réelle (Coupé et al., 2013; De Abreu et al., 2017; Navasiolava et al., 2011). La comparaison de ces deux modèles de simulation de l'impesanteur au sol, a révélé une

augmentation de 40 à 50% de la raideur musculaire après 6h d'immersion alors que ce pourcentage est habituellement atteint après trois à quatre jours de bed-rest. De plus, la baisse des propriétés de contraction musculaire est atteinte au bout de 5 à 7 jours en immersion sèche.

Des contre-mesures pour maintenir les fluides dans les membres inférieurs et atténuer la sensation subjective de congestion de la tête pendant les vols spatiaux sont expérimentés depuis plusieurs années pour lutter contre le déconditionnement cardiovasculaire et le syndrome neuro-oculaire (Robin et al., 2020). Une des contre-mesures est le système de brassards de cuisse veino-constricteurs (« *thigh cuffs* »), constitué d'une manchette élastique fixée autour de la partie supérieure de chaque cuisse, et appliquant une pression d'environ 20mmHg sur la peau (cf. **Figure 20**).



Figure 20 : Illustration représentant les brassards de cuisse (Robin et al., 2020)

L'effet des brassards de cuisse a été étudié au cours d'un vol spatial sur deux astronautes : l'un portant des brassards de cuisse pendant 8 jours de vol et le second sans brassards de cuisse. L'astronaute qui ne portait pas de brassard de cuisse montrait une hypovolémie avec une augmentation de la fréquence cardiaque et du débit cardiaque alors que celui qui utilisait les brassards de cuisse montrait un débit cardiaque stable sans augmentation de la fréquence cardiaque (Arbeille et al., 1999). Une étude plus récente a montré que le déplacement du fluide céphalique au cours des 2-3 premières heures en immersion sèche est moins important dans le groupe portant les brassards de cuisse mais après 4 jours d'immersion sèche, il n'y a pas de différences de déplacement des fluides entre le groupe qui porte les brassards de cuisse et celui qui n'en porte pas (Arbeille et al., 2020). D'après Robin et al.(2020), ces brassards de cuisse induisent chez des volontaires à partir du troisième jour d'immersion, une diminution

moins importante du volume plasmatique c'est-à-dire du volume des liquides circulant contenus dans le sang comparés à un groupe témoin. Ils atténuent mais n'empêchent pas complètement le déplacement de fluides corporels induits par l'immersion sèche.

Les expériences en immersion sèche se sont essentiellement intéressées à la physiologie humaine et notamment à l'étude du muscle postural. Au cours de l'immersion, ni le dos, ni la voûte plantaire ne sont au contact d'un quelconque support, privant ainsi l'individu d'une référence corporelle proprioceptive. On parle dans ce cas de désafférentation, une absence totale ou partielle de sensations, ici proprioceptives, parvenant au cerveau (Shenkman & Kozlovskaya, 2019). Acket et al. (2018) ont également montré qu'une désafférentation aiguë provoquée par l'immersion sèche pourrait induire une réorganisation du cortex somatosensoriel .

Lors de vols spatiaux, les fonctions musculaires squelettiques sont altérées par l'impesanteur et associées à l'hypoactivité. Il s'agit d'un déconditionnement musculaire avec une perte sévère et rapide de la force musculaire, en effet plus de 10% de la force d'extension des jambes peut être altérée après trois jours d'hypoactivité (Demangel et al., 2017), de nombreuses voies biochimiques se désactivent dans les heures qui suivent le repos musculaire conduisant à une perte de la masse et de la force musculaire (Fovet et al., 2021). En effet, lorsque la force de réaction au sol et la charge axiale sont réduites, l'activité électrique du muscle postural diminue fortement. La plupart des unités musculaires passent d'un état d'activité à un état de repos. En impesanteur, la durée de l'état de repos typique observé dans des conditions naturelles sur Terre est dépassé. Cela entraîne une régulation à la baisse de l'activité de ces voies qui jouent un rôle important dans le maintien d'une activité musculaire constante (Shenkman, 2020).

Plusieurs études utilisant l'EEG (électro-encéphalogramme) ont fourni des preuves d'une augmentation de la puissance du rythme alpha lors de vols spatiaux (Van Ombergen et al., 2017). En immersion sèche, la diminution de l'afflux d'informations provenant des entrées proprioceptives entraîne une diminution significative des mécanismes de traitement de l'information de l'hémisphère gauche au 6^{ème} jour d'immersion et une augmentation de l'activité, probablement compensatoire, dans l'hémisphère droit (Kirenskaya et al., 2006). Cette différence d'activation hémisphérique a également été rapportée par Sosnina et al. (2019). De même, Lazarev et al. (2018) ont montré que les ondes alpha étaient plus puissantes au 5^{ème} jour d'immersion, dû à la réduction du flux sensoriel vers le cortex cérébral.

3.2. Études expérimentales en lien avec la prise de perspective d'autrui

Dalecki et al. (2013) ont cherché à déterminer si les performances dans des tâches nécessitant le recours à des cadres de référence allocentré et égocentré sont affectées en condition de vol parabolique. Les participants devaient juger s'ils voyaient une main droite ou gauche (utilisation d'un référentiel égocentré), si les lettres étaient présentées en miroir ou non (référentiel allocentré), et pour les scènes complexes (référentiel égocentré) si l'objet se situait à la gauche ou à la droite de la personne assise. Leur hypothèse suggère qu'en fournissant aux participants une référence verticale visuelle et tactile, la rotation mentale allocentrée mais également les transformations égocentrées ne seraient pas altérées en impesanteur. Les résultats indiquent que les temps de réponses et les taux d'erreurs n'étaient pas altérés en impesanteur par rapport aux conditions gravitationnelles normales, indépendamment du type de stimuli et de leur orientation (Dalecki et al., 2013). Grabherr et al. (2007) ont présenté deux tâches de transformations mentales égocentrées aux participants au cours d'un vol parabolique : dans une tâche, les participants devaient décider quel bras d'un personnage était tendu comme la tâche utilisée par Zacks et al. (2002) et dans l'autre tâche ils devaient décider quelle main (gauche ou droite) était présentée. Il s'agissait de comparer deux stimuli afin de dire s'ils étaient identiques ou différents. Les temps de réponses en 0g étaient significativement plus élevés qu'en 1g dans les deux tâches, suggérant une altération des transformations mentales égocentrées en vol parabolique. De plus, les temps de réponses dans la tâche 2 étaient plus élevés que dans la tâche 1, indiquant que le traitement de différents types de stimuli liés au corps peut être affecté différemment en l'absence de gravité. Ainsi, les temps de réponses plus élevés dans la tâche 2 s'expliqueraient par le fait qu'en l'absence de référentiel spatial gravitationnel, les participants pouvaient associer un grand nombre de postures corporelles différentes pour s'aligner mentalement avec la main. Il est à noter que dans cette étude, le champ visuel du sujet était limité à la tâche grâce au port d'un visiocasque et que les sujets flottaient librement en 0g. En revanche, dans l'étude de Dalecki et al. (2013), les sujets bénéficiaient des références visuelles présentes dans leur environnement et pouvaient ainsi utiliser une référence verticale visuelle présente dans l'avion comme référentiel. Ils étaient aussi attachés à un rack au sol en position assise au moyen d'une ceinture de sécurité par conséquent une référence proprioceptive était présente. Dyde et al. (2009) ont évalués si les individus ont tendance à utiliser l'axe longitudinal du corps pour déterminer la verticale subjective, en vol parabolique. Les participants devaient reconnaître si la lettre p ou d était présentée dans un encart superposé sur un écran où l'orientation de l'arrière-plan pouvait varier. Les résultats révèlent un effet perturbateur du décalage de l'arrière-plan visuel plus marqué ($66,1^\circ$) en gravité normale en vol qu'en phase d'impesanteur ($53,5^\circ$). Ainsi, la perturbation visuelle serait réduite lors des phases d'impesanteur (0g).

Harris et al. (2022) ont évalué l'effet d'une scène visuelle orientée et des changements de postures corporelles en HDBR sur la verticale visuelle subjective, avant, pendant et après 21 jours d'alitement à 6° tête en bas. La verticale visuelle subjective a été mesurée à l'aide d'une baguette lumineuse à positionner pour évaluer la verticale perçue par le participant. La scène est hautement polarisée avec de nombreux indices visuels et présentée soit droite, soit inclinée à $\pm 112^\circ$ par rapport à la verticale gravitationnelle. La tête du participant est positionnée devant l'une des extrémités d'un tunnel cylindrique dont l'autre extrémité est fixée contre un écran d'ordinateur sur lequel est présentée la baguette. Ce dispositif permet au participant de n'avoir aucune information visuelle issue de l'environnement. Plusieurs conditions permettaient de distinguer l'appui sur les indices corporels seulement avec un arrière-plan gris présenté dans la tâche ou d'associer les repères corporels et visuels avec un arrière-plan visuel aligné avec le corps. Harris et al. (2022) ont montré une diminution de l'appui sur la vision après 21 jours de bed-rest et un appui plus important sur les sensations corporelles.

Par ailleurs, en HDBR, dans une tâche de rotation mentale de lettres en position normale ou en miroir, Wang et al. (2017) révèlent des temps de réponses plus élevés en début de HDBR par rapport à la mesure de base avant alitement suivi d'une diminution progressive au cours du HDBR, suggérant l'existence d'une étape de réadaptation au niveau cortical durant les premiers jours en impesanteur simulée (Wang et al., 2017).

Sur le plan exécutif, Wollseiffen et al. (2016) ont évalué les fonctions exécutives en vol parabolique dans une tâche de calcul mental avec quatre niveaux de difficulté. Les participants avaient des temps de réponses significativement réduits en 0g pour les niveaux les plus complexes de la tâche. Par ailleurs, Mekari et al. (2022) ont évalué le fonctionnement exécutif chez 65 adultes à l'aide d'une tâche de Stroop au cours d'un protocole de HDBR. Les performances d'inhibition au test de Stroop sont restées stables durant le bed-rest. En outre, des études cliniques s'intéressant à la maladie de Parkinson ont évalué les effets de brèves périodes en immersion sèche sur les symptômes de ralentissement moteur observés chez ces individus (Gerasimova-Meigal et al., 2021). Au cours de sessions de 45 minutes en immersion sèche, les patients devaient répondre à trois tâches de temps de réaction à difficulté croissante : (1) tâche de temps de réaction simple (appuyer le plus vite possible sur l'un des deux boutons en réponse à un stimulus (flash)), (2) tâche de temps de réaction de difficulté intermédiaire (appuyer le plus rapidement possible lors de l'apparition aléatoire d'un stimulus (cercle rouge)), (3) tâche de temps de réaction multiple (appuyer sur le bouton correct en fonction de la couleur du stimulus) (Meigal et al., 2021). Les résultats ont montré des temps

de réaction améliorés de 20% lors de la tâche la plus complexe et de 8% lors de la tâche intermédiaire, mais pas de modifications des performances dans la tâche simple. Ainsi, plus la tâche était complexe, plus l'effet facilitateur de l'impesanteur simulée en immersion sèche était important. Lazarev (2021) a montré un lien entre l'augmentation des ondes alpha à l'EEG et l'amélioration des temps de réaction au cours d'une tâche attentionnelle en immersion sèche. Ce même effet est également observé au cours de vols paraboliques (Wollseiffen et al., 2016, 2019).

PROBLÉMATIQUE

Sur Terre, la gravité est une référence invariante qui permet de fournir un cadre environnemental stable basé sur la polarité visuelle des éléments (haut/bas) mais également sur la distribution des pressions gravitaires sur le corps, recueillies par les systèmes vestibulaires et proprioceptifs. Ces derniers permettent au système nerveux central de transmettre les informations nécessaires concernant la position et la posture de l'individu dans l'espace (Trousselard et al., 2004). Ces sensations vestibulaires et proprioceptives permettent de savoir où sont situées les différentes parties du corps sans que l'on ait à les observer (Trousselard et al., 2004). Prendre la perspective d'autrui nécessite de s'appuyer sur la représentation de son propre corps afin de se projeter dans la perspective d'une autre personne en utilisant un cadre de référence égocentré (Reed, 2002). Ce dernier s'appuie inconsciemment sur les axes du corps de l'individu qui sont mentalement projetés sur les axes de l'objet externe dans lequel il s'agit de se projeter (Amorim et al., 2006). L'individu s'appuierait ainsi sur sa propre représentation sensori-motrice, aussi connue sous le terme de schéma corporel (Palermo et al., 2014a), tel qu'en témoigne également une activation des zones corticales pariétales et la jonction temporo-pariétale dans les tâches de prise de perspective d'autrui au même titre que dans les tâches qui impliquent de se référer au schéma corporel (Keehner et al., 2006; Martin et al., 2020; Zacks & Michelon, 2005).

En impesanteur, la diminution des forces gravitaires entraîne une altération des entrées sensorielles vestibulaires et proprioceptives (Demertzi et al., 2016). De plus, la faible polarité du cadre environnemental dans l'ISS ne fournit pas de références précises comme sur Terre pour connaître la position de son corps dans l'espace afin d'interagir avec autrui. Malgré cela, en l'absence de la verticale gravitaire, les astronautes situent l'orientation des objets en fonction de l'orientation de leur propre corps, en s'appuyant davantage sur les signaux visuels, autrement dit en repérant l'orientation du bas de leur corps dans l'espace afin d'obtenir une verticale subjective sur laquelle prendre appui (Young et al., 1986). Cependant, pour prendre le point de vue d'autrui, il est nécessaire d'utiliser un cadre de référence égocentré et d'avoir donc recours à une représentation sensori-motrice stable de son propre corps. Cette dernière, s'appuyant habituellement sur les informations proprioceptives (Giummarra et al., 2008; Kammers et al., 2006) et vestibulaires (Arzy et al., 2006; Kaski et al., 2016), serait donc modifiée en situation d'impesanteur. Samson et al. (2010) ont montré que, sur Terre, lorsque les participants ont un point de vue différent de celui d'un avatar, ils ont tendance à prendre leur propre perspective même lorsqu'on leur demande explicitement de considérer celle

d'autrui. Il s'agit d'un « biais égocentrique » qui serait exigeant à surmonter sur le plan cognitif et ferait appel à des processus exécutifs notamment l'inhibition. Au contraire, adopter directement la perspective d'autrui lorsque les deux perspectives ne sont pas en conflit, nécessiterait moins de ressources cognitives se traduisant notamment par une activation réduite des régions corticales fronto-pariétales. Dans cette situation, le calcul de la perspective liée à l'avatar serait un processus cognitivement efficace qui solliciterait relativement peu les fonctions exécutives (Qureshi et al., 2010).

Plusieurs études ont montré que l'altération de la représentation corporelle est immédiate sur Terre suite à une amputation d'un membre, par exemple, (Ehrsson et al., 2004; Palermo et al., 2014a) et que l'incarnation d'un objet externe se fait spontanément en fonction des entrées sensorielles auxquelles l'individu est soumis afin de résoudre une tâche donnée, comme avec l'exemple de la main en caoutchouc. A notre connaissance, la prise de perspective d'autrui n'a pas été étudiée dans des modèles expérimentaux permettent de recréer l'impesanteur, en perturbant les informations reçues par le système vestibulaire et proprioceptif en vol parabolique (Lopez et al., 2008), ou par la perturbation du système proprioceptif et la redistribution des fluides corporels vers le haut du corps en immersion sèche ou en bed-rest qui créent une désafférentation (Clément et al., 2001; Fuentes et al., 2013; Howard & Hu, 2001; Saveko et al., 2023; Tanaka et al., 2017). Seules des tâches de transformations mentales égocentrées d'objets ont été mises en œuvre au cours de vols paraboliques montrant des résultats contradictoires dans des tâches de jugements de latéralité, à savoir une perturbation des performances dans des tâches de transformations mentales égocentrées (Grabherr et al., 2007) et, au contraire, pour Dalecki et al. (2013), une préservation des performances dans ce type de tâche. Ces expérimentations ont mis en place des protocoles avec des caractéristiques différentes, en particulier, le recours possible dans l'étude de Dalecki et al. (2013) à des indices visuels environnementaux alors que dans l'étude de Grabherr et al. (2007) le champ visuel du sujet était limité à la tâche avec le port d'un visiocasque et les sujets flottaient librement, ce qui peut probablement expliquer leurs résultats divergents. Par ailleurs, (Dalecki et al., 2013) ont expliqué la préservation des transformations mentales allocentrées en impesanteur par le fait qu'elles s'appuieraient principalement sur les repères visuels.

L'objectif de ce travail de recherche est d'observer les performances de volontaires dans une tâche originale de prise de perspective d'autrui dans deux modèles de simulation de l'impesanteur - en vol parabolique et en immersion sèche - interférant avec les systèmes vestibulaires et proprioceptifs.

La tâche expérimentale de prise de perspective s'inspire des protocoles de Keysar et al. (2000), de Dumontheil et al. (2010) et a été développée lors d'une étude préliminaire (Meirhaege & Mélan, 2016, 2017). La mise en scène en réalité virtuelle d'un environnement en 2D avec profondeur représentant l'intérieur d'un vaisseau spatial a permis de simuler une tâche coopérative. Cette tâche permet de simuler des situations rencontrées en impesanteur où l'astronaute se retrouve en flottaison sans être aligné verticalement à son collègue ou aux éléments présents dans son environnement. Un dispositif (soit RV, soit tunnel optique) a permis de couvrir complètement le champ visuel des participants afin d'assurer une immersion maximale. Un avatar qui se situe devant ou derrière une étagère à 4x4 casiers, donne des instructions au participant pour déplacer, selon le point de vue de l'avatar, des objets présents sur l'étagère en flottaison dans la scène. L'avatar, couramment utilisé dans les tâches de prise de perspective d'autrui, constitue un repère égocentré. L'étagère constitue un repère visuel qui sert à la mise en œuvre d'un cadre de référence allocentré puisque le bas est indiqué comme point d'orientation (haut/bas) vertical de référence (Berthoz et al., 2008; Foley et al., 2015; Habacha et al., 2017; Martolini et al., 2020). Ce type de dispositif immersif permet de promouvoir l'empathie et les comportements pro-sociaux (Herrera et al., 2018; Mado et al., 2021). De plus, les participants à forte empathie auraient une plus grande tendance à se plonger dans des simulations montrant des performances supérieures dans ces tâches (Mattan et al., 2015).

Le protocole a permis de dissocier différents processus (respectivement, allocentré et égocentré) selon que l'orientation de l'étagère ou de l'avatar est manipulée dans la tâche de prise de perspective. La prise de perspective d'autrui est testée dans deux conditions dans lesquelles l'avatar se trouve derrière l'étagère : une condition où seul l'avatar est incliné que nous appelons « inclinaison avatar » et une condition où l'avatar est incliné en même temps et dans la même direction que l'étagère : « inclinaison congruente ». L'objectif de ces conditions est de générer l'utilisation d'un cadre de référence égocentré permettant au participant d'effectuer une prise de perspective d'autrui (en l'occurrence celle de l'avatar, dans des positions inhabituelles qu'il est impossible à prendre sur Terre). Nous supposons ainsi que la prise de perspective d'autrui serait facilitée en impesanteur simulée puisque la tendance à prendre son propre point de vue serait réduite en raison de la réduction des entrées sensorielles visuelles, vestibulaires et proprioceptives. Ainsi, **nous posons l'hypothèse que dans ces conditions, la prise de perspective d'autrui facilitée pourrait résulter d'un biais égocentrique réduit.**

L'originalité de ce travail est double. D'une part, il se focalise sur une capacité de cognition sociale qui n'a pas été étudiée dans des conditions en impesanteur simulée. D'autre part, nous introduisons l'inclinaison d'un avatar pour inciter les participants à prendre des

orientations qu'ils ne prennent pas habituellement sur Terre. **Le recueil de données se déroule en deux parties.** Une première étude a été réalisée en vol parabolique pour tester cette hypothèse chez des participants volontaires dans la tâche expérimentale mais aussi à partir de l'évaluation subjective de la charge mentale par les participants. La seconde étude, réalisée en immersion sèche, vise à étudier les effets d'une contre-mesure sur les performances de prise de perspective et sur l'activité cérébrale observée durant la réalisation de la tâche. Nous testerons également la spécificité de ces effets en évaluant les performances cognitives non sociales impliquées dans la réalisation d'une prise de perspective d'autrui, notamment les capacités attentionnelles et certaines fonction exécutives. Nous détaillerons les hypothèses de chaque expérimentation plus précisément au début de chaque partie expérimentale.

PARTIE EXPÉRIMENTALE

EXPERIENCE 1 :

Prise de perspective en impesanteur au cours de vols paraboliques

Les sensations corporelles perçues par le système nerveux central s'effectuent via les systèmes sensoriels vestibulaires et proprioceptifs (Preuss et al., 2013). Le modèle de vol parabolique induit, lors des phases de 0g, une perturbation du système vestibulaire qui recueille habituellement les informations d'orientation du corps dans l'espace (Chabeauti, 2012) ainsi qu'une diminution des entrées proprioceptives avec peu de contraintes gravitaires exercées sur le corps. Comme décrit ci-dessus dans la problématique générale, la représentation sensori-motrice du corps est construite à partir de ces informations sensorielles (Arzy et al., 2006; Giummarra et al., 2008; Kammers et al., 2006; Kaski et al., 2016). Sur Terre, les individus ont tendance à privilégier leur propre perspective même lorsqu'on leur demande explicitement de considérer la perspective d'une autre personne (Samson et al., 2010). En vol parabolique, au cours des phases de 0g, la tendance à prendre son propre point de vue serait réduite en raison de la réduction des entrées vestibulaires et proprioceptives. C'est pourquoi, nous postulons une facilitation de la prise de perspective d'autrui au cours de la tâche de prise de perspective.

Hypothèse 1 : L'impesanteur a un effet facilitateur sur la prise de perspective égocentrée : les performances (temps de réponses (TR) et taux de réponses correctes) dans les conditions critiques « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » de la tâche de prise de perspective sont plus élevées en 0g qu'en 1g (TR plus rapides et taux de réponses correctes plus élevés).

En raison de la facilitation attendue dans la tâche de prise de perspective d'autrui au cours des conditions de transformations mentales égocentrées, la charge mentale perçue de la tâche de prise de perspective devrait également être plus réduite en 0g qu'en 1g, Steinberg et al. (2015) ont ainsi montré que l'effort psychologique, l'état de motivation et la charge de travail n'ont pas été affectés en 0g tandis que l'effort physique perçu et le cortisol étaient augmentés. Ils concluent que le stress physique serait plus élevé pendant le vol parabolique car plus de ressources sont allouées au système moteur avec les phases cumulées de 0g et de 2g. De plus, Stahn et al. (2020) suggèrent un recours plus important à la mémoire de travail et un traitement attentionnel plus soutenu en 0g pouvant induire plus facilement des erreurs au cours de tâches motrices de longues durées impliquant un déplacement spatial vers un objet

qui se situe à une distance élevée du point de départ (45 mètres contre 25 mètres pour les courtes distances). Cette charge ressentie serait influencée par les phases de 2g qui créent un stress supplémentaire dans la perception de l'effort physique. Par ailleurs, les phases courtes de 22 secondes d'impesanteur simulée au cours du vol parabolique imposent une restriction temporelle pour effectuer la tâche ce qui pourrait constituer un facteur de stress (Collado et al., 2017). On peut donc penser que les scores d'exigence physique et temporelle perçus constituent des indicateurs de « stress » et qu'ils seraient plus élevés en 0g qu'en 1g en vol mais également significativement plus élevés lors des phases de 1g en vol comparativement à la session en post-vol.

Hypothèse 2 : La charge mentale ressentie au cours de la tâche de prise de perspective est moins importante en 0g qu'en 1g : Les scores d'exigence mentale, d'effort mental et de frustration ressentis par les participants au cours de la tâche sont moins élevés en 0g qu'en 1g, et les scores de performance ressentie sont plus élevés en 0g qu'en 1g.

A l'inverse, les scores d'exigence physique et temporelle sont plus élevés en 0g qu'en 1g en vol, et en 1g en vol comparés à ceux perçus après le vol, sur Terre.

La facilitation observée en 0g serait nuancée en fonction du style cognitif des participants. En effet, Howard & Hu (2001) ont montré que le référentiel visuel est dominant lorsque les indices gravitaires sont absents (Howard & Hu, 2001). Or, au cours de la tâche de prise de perspective, les indices visuels de l'environnement sont masqués par le port d'un casque de réalité virtuelle qui limite les informations visuelles à la scène virtuelle projetée. De ce fait, lors des phases de 0g, il serait plus aisé pour les individus visuo-indépendants de réaliser la tâche dans les conditions qui requièrent l'utilisation d'un cadre de référence égocentré car ils s'appuient habituellement sur les indices sensoriels corporels (vestibulaires et proprioceptifs) comparés aux participants dépendants du champ visuel, qui s'appuient sur les indices visuels présents dans l'environnement (virtuel).

Hypothèse 3 : Les performances dans les conditions de prise de perspective égocentré des participants visuo-indépendants sont supérieures à celles des participants visuo-dépendants.

Enfin, le quotient d'empathie a été évalué afin de vérifier l'hypothèse que les aptitudes empathiques sont essentielles pour la prise de perspective d'autrui dans notre dispositif, tout

comme cela a été montré pour la prise en compte des états mentaux d'autrui dans des contextes sociaux (Herrera et al., 2018; Mado et al., 2021). Nous supposons que les performances à la tâche de prise de perspective sont influencées par le niveau d'empathie des participants, en effet, plus le quotient d'empathie est élevé, meilleures seraient les performances des participants car plus les participants auraient une forte empathie, plus grande serait la tendance à se projeter dans des simulations (Mattan et al., 2015).

Hypothèse 4 : Les capacités d'empathie sont corrélées avec les performances de prise de perspective égocentrée

Étude Préliminaire en vol parabolique : mise au point du dispositif

Une étude préliminaire a été réalisée lors d'une première campagne (25 Septembre au 06 Octobre 2017, VP131) afin de réaliser un test technique du matériel et des procédures expérimentales, ainsi que d'évaluer la faisabilité de la tâche expérimentale dans des conditions de vol parabolique qu'il est impossible d'anticiper. A l'issue de ces essais, le dispositif et le protocole (nombre d'essais, synchronisation de l'enregistrement des réponses avec l'horloge à bord,...) ont été adaptés aux conditions de vol en impesanteur (remplacement de la souris à bille par une souris conventionnelle, ajout d'un support de souris rigide fixé sur le haut de la cuisse, synchronisation du temps entre l'horloge de l'ordinateur et celle de l'avion).



Figure 21 : Photographie réalisée lors de l'étude préliminaire en vol parabolique. Deux expérimentateurs gèrent l'expérimentation avec les ordinateurs au sol dans l'avion et les deux autres expérimentateurs réalisent la tâche assis sur les sièges prévus à cet effet

Le Comité de Protection des Personnes a donné un avis favorable à la réalisation de l'étude en Décembre 2017 (Référence CPP : 69-217, **Annexe 1**). L'expérimentation a eu lieu lors de la campagne de vols paraboliques au printemps 2018, VP135, grâce à une convention établie avec Novespace et un financement par le CNES (Centre National d'Études Spatiales).

1. Méthodologie

1.1. Sujets

Les participants devaient répondre aux critères d'inclusion suivants (incluant des critères spécifiquement demandés par Novespace) :

- Être volontaire
- Être âgé entre 25 et 55 ans
- Être affilié à un régime de Sécurité Sociale ou titulaire d'une Carte Européenne d'Assurance Maladie
- Avoir passé un certificat médical d'aptitude aux vols paraboliques (équivalent au FAA Class III) dans les 8 semaines précédant la date prévue de la campagne de vol (interrogatoire médical, analyse d'urine, tests visuels, auditifs, électrocardiogramme).
- Avoir donné son consentement éclairé

En outre, les participants devaient avoir précédemment participé à une campagne de vols paraboliques. Ce critère visait à réduire l'exclusion de participants sujets au « mal de l'air », affectant en moyenne 10% des volontaires malgré un traitement prophylactique sous forme d'une injection en sous-cutané de scopolamine (anticholinergique agissant comme antagoniste de l'acétylcholine). Étaient exclus de l'expérimentation tous les sujets présentant des antécédents médicaux, ou toute pathologie aigüe ou chronique, neurologique ou psychiatrique, leur faisant courir un risque ou pouvant affecter leurs performances en condition de vol parabolique. De même, des sujets avec une acuité visuelle après correction inférieure à 5/10^{ème} ou une acuité auditive corrigée insuffisante pour entendre des consignes orales en condition de vol n'étaient pas recrutés pour l'étude.

Douze participants de sexe masculin, âgés de 35 à 49 ans (Moyenne d'âge : 44 ans ; ET = 3,05), ayant déjà effectué un vol parabolique, ont été recrutés pour l'étude via la base de données de Novespace (cf. Tableau 1). Ils ont donné leur consentement libre et éclairé (cf. **Annexe 2**) en accord avec les normes éthiques de la Déclaration d'Helsinki de l'AMM (Association Médicale Mondiale).

Tableau 1 : Données sociodémographiques des participants (NR : Non renseigné)

N° de participant	Niveau d'études	Age
1	Bac+5	42
2	NR	49
3	BEPC Niveau 1ere S	48
4	BAC +3	45
5	Ingénieur (SUPAERO)	41
6	Bac + 5	45
7	NR	48
8	BTS électronique et formation de pilote de ligne	41
9	NR	47
10	BAC+4	46
11	DUT	45
12	Bac+5	35

1.2. Procédure générale

En France, les campagnes de vols paraboliques se déroulent à l'aéroport de Mérignac à Bordeaux (France) dans les locaux de Novespace, chacune sur une période de 15 jours. Durant la première semaine, le matériel, notamment les ordinateurs, sont installés sur des supports adéquats qui sont vissés au sol de l'avion.

De nombreux contrôles de sécurité sont réalisés par les ingénieurs de Novespace afin de tester la fiabilité de chaque expérience, notamment des branchements électriques, ainsi que l'activation simultanée de la dizaine d'expériences qui seront embarquées au cours d'un vol. Les participants arrivent le lundi matin de la deuxième semaine et participent à un briefing de sécurité obligatoire pour les participants y compris les expérimentateurs, le lundi après-midi. Trois vols sont programmés sur les trois jours suivants (mardi, mercredi, jeudi) ; le vendredi est un jour de report possible d'un vol en cas d'intempéries.

Les participants réalisent différents tests cognitifs le lundi (tests pré-vol ; voir infra). Quatre participants embarquent pour chacun des vols après avoir reçu une dose standard de 0,7 mg de scopolamine par injection, 30 minutes avant de monter à bord. Deux participants réalisaient

la tâche au cours des 15 premières paraboles d'un vol et les deux autres participants au cours des 15 autres paraboles.

A bord de l'A310 Zéro-G, les sujets sont assis sur des sièges standards d'avion, sécurisés par une ceinture de sécurité standard et leurs pieds étaient glissés sous une sangle pour éviter que leurs jambes ne se soulèvent en phase d'impesanteur (cf. **Figure 22**). La sangle et la ceinture étaient suffisamment détendues pour ne pas contrarier les perceptions tactiles et proprioceptives en phase d'impesanteur (repères tactiles et proprioceptifs). Les participants réalisant la tâche étaient équipés d'un casque de réalité virtuelle (Oculus Rift DK2) et d'un casque audio Sennheiser HD380 PRO qui diffusait les instructions relatives à la tâche, mais réduisait aussi l'amplitude du bruit ambiant, tout en permettant au participant d'entendre les indications des pilotes.



Figure 22 : Installation et équipements des participants lors de la réalisation de la tâche dans l'avion Zéro-G

Une tablette rigide (20x30 cm) était attachée sur la cuisse droite du participant grâce à une sangle. Elle lui permettait de déplacer une souris, sécurisée à son poignet par une sangle, afin de réaliser la réponse demandée (déplacer un objet d'une case à une autre de l'étagère présentée dans le casque de RV). Deux ordinateurs qui géraient la tâche de prise de perspective et enregistraient les réponses des participants étaient fixés sur une plaque en acier vissée aux rails prévus à cet effet sur le sol de l'avion. Deux expérimentateurs étaient présents chaque jour de vol dans l'avion ; l'un installé et sécurisé par terre devant les ordinateurs pour gérer le déroulement de la tâche ; l'autre se tenait debout derrière les fauteuils pour répondre aux questions/commentaires des participants (qui sont privés d'informations visuelles du fait du port du casque) et surveiller leur état général (mal des transports).

1.3. Matériel

Les participants ont réalisé plusieurs tâches au cours de la campagne de vol parabolique :

- les tâches expérimentales de prise de perspective - la cotation d'un questionnaire de charge mentale perçue (NASA-TLX ; Hart & Staveland, 1988) ont été réalisés avant, pendant et après le vol ;
- un test évaluant la verticale subjective (test de la baguette et du cadre) (Asch & Witkin, 1948) - un questionnaire d'empathie (Baron-Cohen & Wheelwright, 2004) avant le vol (cf. **Figure 23**).

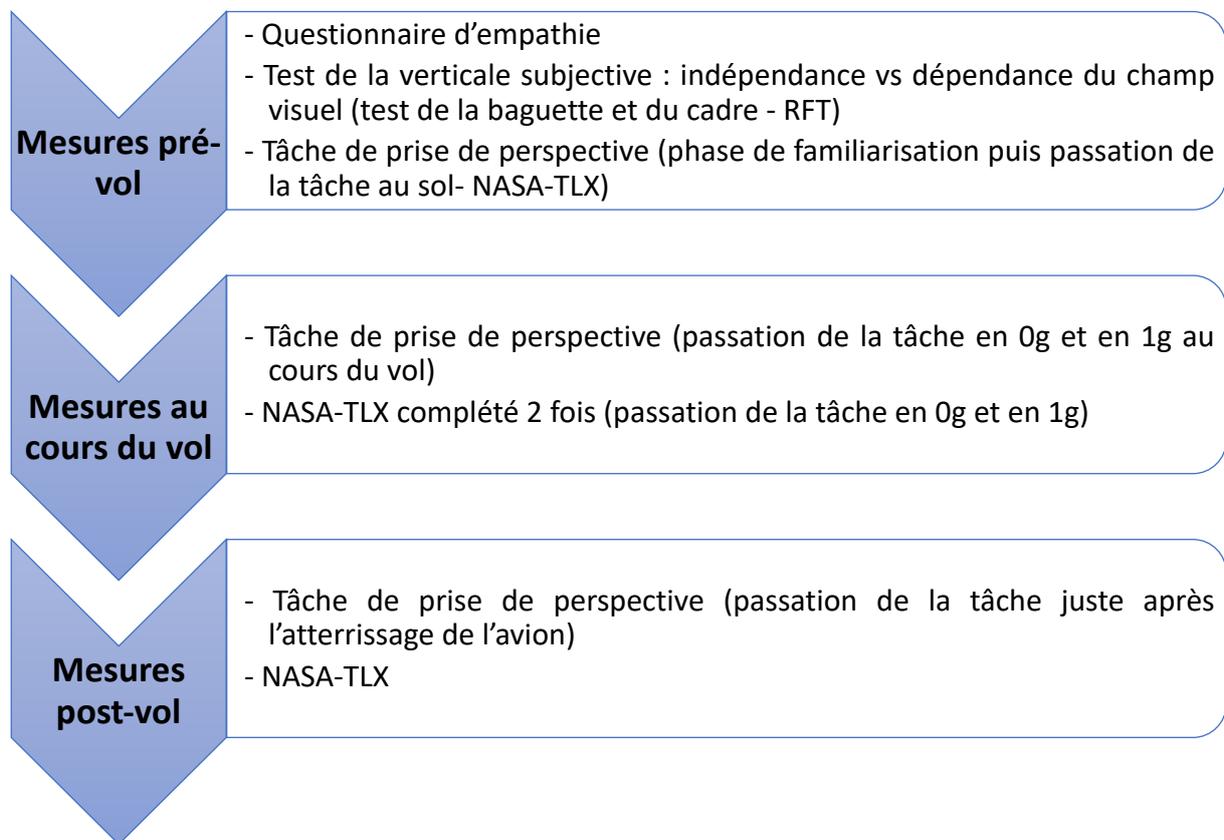
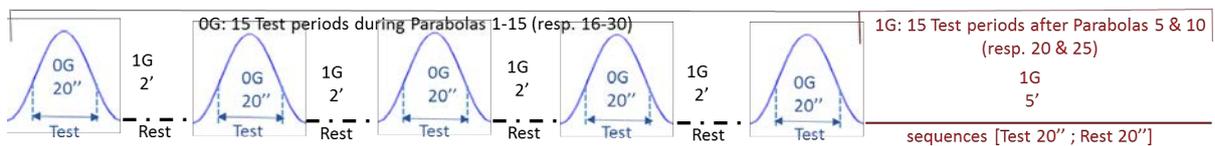


Figure 23 : Déroulement du protocole expérimental : 3 séances

- **Mesures pré-vol (« Preflight »)** : Lors du premier jour de la semaine d'expérimentation, tous les participants ont complété le questionnaire d'empathie et réalisé le test de la baguette et du cadre dans les locaux de Novespace. Puis, ils ont réalisé la phase de familiarisation de la tâche de prise de perspective ainsi que sa passation en pré-vol à bord de l'avion au sol (moteurs éteints) afin que les conditions de passations soient aussi proches que possible de celles pendant le vol parabolique. Le NASA-TLX était complété immédiatement après la passation de la tâche. Les données de prise de perspective recueillies en pré-vol ont permis d'obtenir des mesures de ligne de base. Le nombre d'essais était fixe et identique pour tous les participants (12 blocs de 6 essais).
- **Mesures au cours du vol (« Inflight »)** : La session d'expérimentation a lieu environ 30 à 45 minutes après le début du vol. Une pause de 5 minutes a lieu toutes les 5 paraboles et une pause de 8 minutes a lieu à la moitié du vol, après la 15^{ème} parabole.



L'horloge de l'ordinateur est initialement réglée sur celle de l'avion pour permettre d'identifier à postériori les phases de l'expérience réalisées en 0g et en 1g en vol.

Pour chaque participant, les performances sont évaluées durant le vol en période de 0G pendant 15 paraboles et en période de vol stabilisé (1g) durant les deux pauses de 5 minutes introduites après la 5^{ème} et la 10^{ème} parabole. Pendant ces dernières, les participants réalisent la tâche de prise de perspective par périodes de 20 secondes alternant avec des périodes de 20 secondes de repos. Pendant le vol le nombre d'essais réalisés différait entre les participants selon la rapidité avec laquelle ils réalisaient un essai (expérimentation sur 22 secondes en 0g et 20 secondes en 1g). Un essai qui est commencé en phase de 0g ne devait pas être terminé durant la phase de 2g qui suivait.

L'expérimentation durant les phases de 1g en vol permet de contrôler l'effet du contexte (bruit ambiant, instructions des pilotes, avion en mouvement, stress, etc.). A la fin des 15 paraboles, les participants complétaient le NASA-TLX à deux reprises : en 0g et 1g, afin d'évaluer la charge de travail perçue, respectivement.

- **Mesures post-vol (« Postflight »)** : immédiatement après l'atterrissage de l'avion soit 30 à 45 minutes après la fin des 30 paraboles, la tâche de prise de perspective était à nouveau effectuée à bord de l'avion au sol.

1.3.1. Tâche expérimentale de prise de perspective

La tâche de prise de perspective, implémentée sur Matlab 2014b (MathWorks, Natick, USA) par Meirhaege (2016) sur la base de celui décrit par Meirhaeghe & Mélan (2016), a comme originalité d'induire une prise de perspective « non naturelle » en mettant en scène l'inclinaison d'un avatar dans le plan frontal (inclinaison du corps de l'avatar à $\pm 45^\circ$), pour tester l'utilisation du référentiel égocentré. Dans toutes les conditions expérimentales, un avatar était présenté devant ou derrière une étagère qui flottait au centre d'une image statique en 2D représentant l'intérieur d'un vaisseau spatial (cf. **Figure 24**).

L'étagère rectangulaire comporte 4x4 casiers et un indice visuel proéminent ainsi qu'un socle dans sa partie inférieure permettant de dissocier le haut et le bas de l'étagère. A chaque essai, trois objets identiques (par exemple, trois extincteurs) apparaissent dans des compartiments individuels de l'étagère et une consigne orale indique au participant l'objet à déplacer (celui du haut/bas) et la direction dans laquelle il doit le déplacer (vers le haut/bas ; gauche/droite). Les compartiments sont de forme arrondie afin de garder la même apparence même lorsque l'étagère est inclinée. L'emplacement et la nature des objets varient à chaque essai.

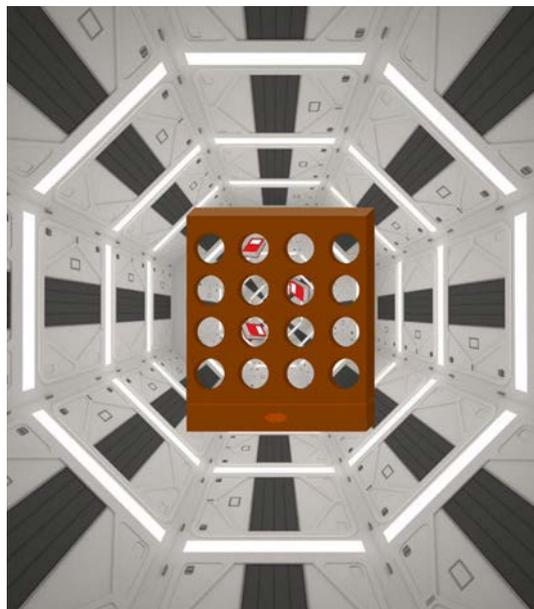


Figure 24 : Image extraite du protocole de prise de perspective représentant l'étagère carrée flottant dans le vaisseau spatial. Elle comporte de nombreux compartiments où sont positionnés 3 objets identiques (ici des extincteurs).

Déroulement d'un essai :

Le protocole est lancé sur un ordinateur Dell Alienware Cassini 15 et la scène avec l'étagère est projetée dans un casque de réalité virtuelle (Oculus Rift DK2).

Chaque essai débute par la présentation d'une croix de fixation au centre de l'écran. Le participant appuie sur la touche de gauche de la souris pour démarrer l'essai. La scène est alors projetée dans le casque et un avatar représentant un collègue astronaute (homme ou femme, de façon aléatoire) apparaît brièvement (1 seconde) devant ou derrière l'étagère, à la verticale ou incliné. Puis la consigne verbale est donnée (via le casque auditif) (*par exemple*, « déplace l'extincteur du haut vers le bas »). A l'aide de la souris, le participant doit glisser-déposer l'objet identifié dans le compartiment demandé. **Il est informé que la tâche doit être réalisée depuis le point de vue de l'avatar.** Il est à noter qu'une brève apparition de l'avatar avant de diffuser l'instruction favorise l'utilisation d'une stratégie mentale pour réaliser la tâche, par opposition à une stratégie purement perceptive. Les résultats de l'étude préliminaire ont en effet révélé que lorsque l'avatar est présent pendant toute la durée de l'essai, il peut être utilisé comme référence visuelle pour déterminer les directions gauche/droite et haut/bas. La suppression de l'avatar avant la présentation de la consigne permet également de s'assurer que seule l'orientation de l'étagère pouvait servir de référence visuelle d'autant plus qu'elle possède une polarité haut-bas. Le *temps de réponse* (mesuré entre la fin de l'instruction verbale et le relâchement du clic de souris dans le compartiment cible) et le *déplacement de l'objet* vers le compartiment approprié (taux de réponses correctes) sont recueillis. Si le temps de réponse est supérieur à 15 secondes, l'essai se termine et de nouveau la croix de fixation apparaît sur l'écran afin de débiter un nouvel essai. La réponse est alors enregistrée comme une erreur et le temps de réponse correspond à 15 sec. Aucun feedback n'est donné sur l'exactitude des réponses pendant le déroulement de la tâche proprement dite.

Au début de l'expérimentation, une phase de familiarisation est proposée aux participants. Celle-ci permet de détailler le protocole, de présenter l'avatar ainsi que les mouvements à réaliser pour déplacer correctement les objets sur l'étagère à l'aide de la souris. Cette phase de familiarisation dure environ 10 minutes. Un feedback est présenté à chaque étape de cette phase de familiarisation afin de s'assurer que tous les participants maîtrisent les différents aspects du protocole avant le début de l'expérience.

Déroulement d'une séance de test : Le test se déroule sur une durée d'environ 10 minutes. 15 blocs de 6 essais sont présentés ; à l'intérieur de chaque bloc, six conditions expérimentales sont présentées de façon randomisée. Les sujets ont reçu l'instruction de maintenir leur tête droite durant l'expérimentation, mais l'image affichée dans le casque reste immobile par rapport à la rétine. Cela garantit que l'image visualisée par les sujets soit complètement indépendante d'éventuels mouvements de la tête, et empêche de résoudre la tâche de prise de perspective en inclinant la tête par exemple dans la même direction que l'avatar.

Les six conditions expérimentales diffèrent par la position et l'orientation de l'avatar et par l'orientation de l'étagère. Parmi celles-ci, on distingue *deux conditions contrôles* dans lesquelles seule la **position de l'avatar** est manipulée :

- **Dans la première condition contrôle**, « *perception directe* », l'avatar apparaît à la verticale devant l'étagère (celle-ci demeurant également à la verticale). Cette condition ne nécessite aucune prise de perspective pour être résolue, il s'agit de la perception et du déplacement d'un objet dans une perspective réalisée à la 1^{ère} personne (la perspective du participant) (cf. **Figure 25**).

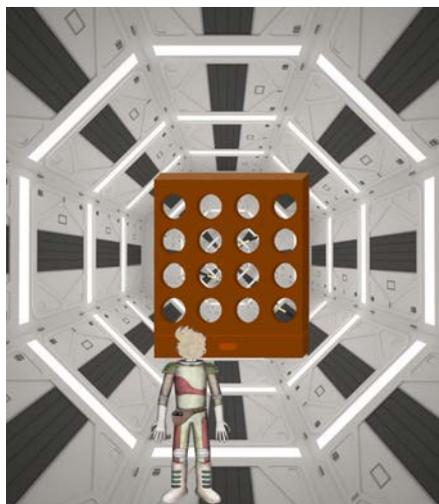


Figure 25 : Condition contrôle « perception directe » : étagère à la verticale avec avatar devant l'étagère à la verticale

- Dans la **seconde condition contrôle**, « *prise de perspective standard* », l'avatar se situe également à la verticale, mais derrière l'étagère (face au participant) qui est elle aussi présentée à la verticale. Cette condition nécessite une prise de perspective afin de s'imaginer regarder la scène du point de vue de l'avatar (derrière l'étagère) (cf. **Figure 26**).



Figure 26 : Condition contrôle « prise de perspective standard » : étagère à la verticale, avatar derrière l'étagère, également à la verticale

Dans les trois conditions critiques, ce sont l'orientation de l'avatar et/ou de l'étagère qui sont manipulés. Dans toutes ces conditions, l'avatar se situe derrière l'étagère, nécessitant donc une prise de perspective.

- la **première condition**, « *inclinaison étagère* », correspond à l'inclinaison de l'étagère uniquement ($-45^{\circ}/+45^{\circ}$ par rapport à la verticale); l'avatar étant présenté à la verticale. L'objectif de cette condition est de manipuler l'orientation du repère visuel afin d'en observer l'impact sur les performances de prise de perspective (cf. **Figure 27**).

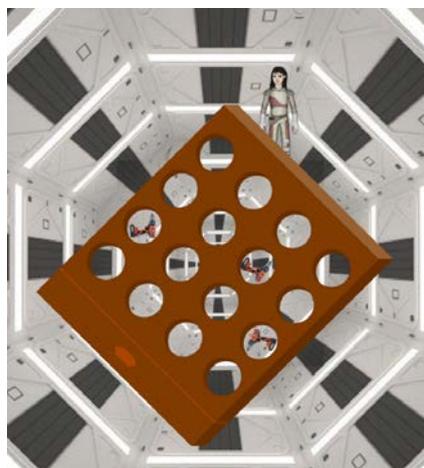


Figure 27 : Condition critique : "inclinaison étagère" : L'étagère est inclinée ($-45^{\circ}/+45^{\circ}$) et l'avatar est à la verticale derrière l'étagère

- **la deuxième condition critique, « inclinaison avatar »**, correspond à l'inclinaison de l'avatar uniquement ($-45^{\circ}/+45^{\circ}$ par rapport à la verticale) ; l'étagère restant cette fois-ci à la verticale. La position de l'avatar est qualifiée de « non-naturelle » puisqu'il est impossible d'adopter cette position sur Terre en raison de la force gravitaire : l'axe longitudinal du corps n'étant jamais incliné à 45° . L'objectif de cette condition est de générer l'utilisation d'un cadre de référence égocentré permettant au participant d'effectuer une prise de perspective d'autrui (en l'occurrence de l'avatar) (cf. **Figure 28**).



Figure 28 : Condition critique : « inclinaison avatar » où seul l'avatar est incliné ($-45^{\circ}/+45^{\circ}$)

- **la troisième condition critique, « inclinaison congruente »**, correspond à l'inclinaison à la fois de l'avatar et de l'étagère à 45° dans la même orientation (cf. **Figure 29**).

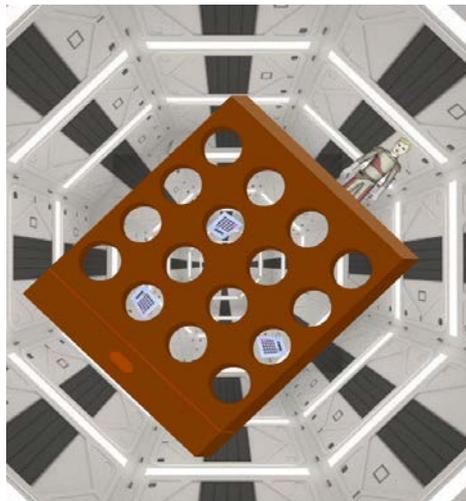


Figure 29 : Condition critique " inclinaison congruente"

La direction d'inclinaison a été équilibrée entre les participants soit $+45^{\circ}$ dans le sens des aiguilles d'une montre pour la moitié des sujets et -45° dans le sens antihoraire pour l'autre moitié des sujets.

Une condition d'inclinaison incongruente dans laquelle avec l'étagère et l'avatar étaient inclinés à 45° dans des orientations opposées faisait également partie du protocole. Cependant, cette condition a été exclue des analyses statistiques puisque le protocole n'incluait pas de condition contrôle correspondante dans laquelle l'avatar est dans une position verticale et l'étagère inclinée à 90° par rapport à l'avatar.

Ce protocole permet de tester séparément et simultanément le rôle des informations visuelles (**référentiel allocentré**) et des informations vestibulaires et proprioceptives (**référentiel égocentré**) dans une tâche de prise de perspective. L'influence du référentiel **allocentré** sur la prise de perspective est étudiée dans la condition où seule l'étagère est inclinée car il s'agit d'un objet présent dans l'environnement. L'influence du référentiel **égocentré** s'observe dans la condition où seul l'avatar est incliné ainsi que dans la condition « inclinaison congruente ». Dans ces deux conditions, le participant doit s'appuyer sur la perspective de l'avatar en effectuant une prise de perspective à la troisième personne afin d'adopter son point de vue, non naturel.

1.3.2. Test de dépendance à l'égard du champ visuel : Rod and Frame Test

Le test de la baguette et du cadre (« *Rod and Frame Test* »), développé par Witkin & Asch (1948a, 1948b), est un test permettant d'évaluer si la perception de la verticale subjective (une baguette) est influencée par la présence d'un repère visuel (un cadre incliné). Cela permet de tester la dépendance-indépendance à l'égard du champ visuel qui correspond à la tendance spontanée des sujets à privilégier les informations visuelles ou gravitaires. Les sujets doivent orienter une baguette par rapport à la direction de la gravité représentant la verticale visuelle subjective. Il s'agit de mettre en exergue la valeur angulaire entre la verticale réelle et la perception subjective de la verticale, pouvant être déviée en raison de la présence du cadre incliné. Cet « effet cadre » (« *rod-and-frame effect* ») est donc le résultat de la compétition entre les informations visuelles – erronées - et graviceptives (indications vestibulaires et somesthésiques de la verticale dépendant de la gravité terrestre) (cf. **Figure 30**).

Dans notre étude, si la vision est utilisée préférentiellement dans la perception de la verticale subjective (effet cadre), les sujets sont dits dépendants du champ visuel (« *field-dependant* ») alors que si les informations graviceptives sont principalement prises en compte via les systèmes vestibulaires et somatosensoriels (absence d'effet cadre), les sujets seraient indépendants du champ visuel (« *field-independant* ») (Isableu et al., 2003).

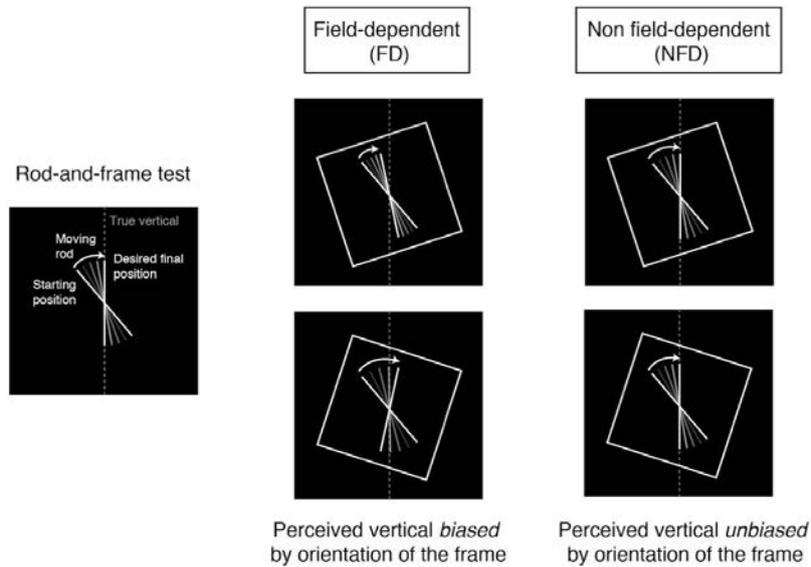


Figure 30 : Illustration représentant le test avec inclinaison de la baguette (volet à gauche) et de la baguette et du cadre (volets à droite). Les individus dépendant du champ visuel (« field-dependent ») n'alignent pas correctement la baguette alors qu'à droite, ceux indépendants du champ visuel (« non field-dependent ») alignent correctement la baguette à la verticale, indépendamment de la présence du cadre incliné (Meirhaeghe et al., 2020).

Grâce à une recherche bibliographique nous avons analysé les dispositifs et les méthodologies décrits dans la littérature pour ce test (Bagust et al., 2013; Bonan et al., 2006; Pavlou et al., 2011; Tasseel-Ponche et al., 2017). Les dispositifs impliquent typiquement la suppression des informations visuelles environnantes afin de restreindre les informations visuelles à celles fournies lors du test (la baguette et le cadre). Pour ce faire, certains auteurs ont effectué le test dans l'obscurité avec un fond d'écran noir, d'autres ont disposé un cylindre noir de 50 cm de longueur devant l'écran d'un ordinateur (cf. **Figure 31**) puis ont demandé aux sujets de poser leur visage contre l'extrémité opposée du cylindre. Un tissu noir peut aussi recouvrir la tête du sujet pour éliminer d'éventuelles sources lumineuses ou des informations visuelles.

Nous avons eu recours à ces trois moyens (salle obscure, cylindre de 50 cm de long et 17cm de diamètre, tissu noir recouvrant la tête et les épaules du participant). De plus, les participants, assis devant une table face à l'écran, devaient s'appuyer seulement sur leurs talons afin de limiter les informations proprioceptives provenant de la voûte plantaire (Isableu et al., 2008).

La plupart de ces études décrivent deux phases/conditions de test : (1) une condition durant laquelle la baguette est présentée seule afin de déterminer la verticale subjective spontanée, (2) puis une condition dans laquelle la baguette est présentée avec le cadre. Dans la condition sans cadre, la baguette est généralement orientée à $-40^{\circ}/+40^{\circ}$ par rapport à la verticale

(Bonan et al., 2006; Pavlou et al., 2011; Tasseel-Ponche et al., 2017), tandis que dans la condition avec cadre, la baguette est orientée à $-20^{\circ}/+20^{\circ}$ d'angle et le cadre à $-18^{\circ}/+18^{\circ}$ (Bagust et al., 2013b; I. V. Bonan et al., 2006; Tasseel-Ponche et al., 2017).

En prenant appui sur ces différentes études, en particulier celle de Bagust et al. (2013), une version informatisée du test a été développée. Dans cette version, une brève phase de familiarisation, incluant un essai par condition (sans cadre/avec cadre) permettait aux participants de s'approprier les consignes ainsi que la modalité de réponse en déplaçant avec la souris l'extrémité extérieure de la baguette (barre lumineuse de 4 cm de long) jusqu'à ce qu'ils estiment qu'elle est orientée à la verticale. Lorsque celle-ci leur semble alignée à la verticale subjective, ils cliquent sur la souris pour confirmer leur réponse. Le test à proprement parler se présente sous forme d'une séquence de 10 essais sans cadre, suivie d'une séquence de 10 essais avec cadre. L'orientation à gauche ou à droite de la baguette ($+40^{\circ}/-40^{\circ}$) lors de la 1^{re} phase et de la baguette ($+18^{\circ}/-18^{\circ}$) et du cadre ($+20^{\circ}/-20^{\circ}$) lors de la 2^e phase se fait selon un ordre pseudo-aléatoire. Aucune limite de temps n'est imposée ; les participants ont pour objectif d'être le plus précis possible. L'ordinateur enregistre le temps de réponse ainsi que l'angle entre la baguette et la verticale. Les valeurs d'erreurs négatives indiquent une erreur dans le sens anti-horaire et les valeurs positives une erreur dans le sens horaire. La durée du test est d'environ 3 minutes.



Figure 31 : Dispositif de tunnel optique (cylindre noir apposé sur l'écran de l'ordinateur).

La méthode de Nyborg (Nyborg & Isaksen, 1974) a été utilisée pour quantifier la dépendance (« *field-dependent* ») de chaque sujet au champ visuel. Cette méthode permet de comparer les erreurs d'angles lorsque le cadre est incliné dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport à celles lorsque le cadre est incliné dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Les méthodes de calcul sont les suivantes :

Pour les essais sans cadre :

- calculer l'angle moyen individuel de décalage (Baguette -40° (gauche, G) et $+40^\circ$ (droite, D)) : ce calcul sert de référence à la verticale subjective en condition « neutre » ;
- calculer le temps moyen individuel de réponse (Baguette -40° (gauche) et $+40^\circ$ (droite)) ;

Pour les essais avec cadre :

- calculer l'angle moyen individuel de décalage pour les 4 combinaisons possibles d'inclinaison de la baguette et du cadre : GG (-18° ; -20°) ; DD ($+18^\circ$; $+20^\circ$) ; GD (-18° ; $+20^\circ$) ; DG ($+18^\circ$; -20°).

La soustraction de l'angle moyen de décalage sans le cadre à l'angle moyen de décalage avec cadre permet de classer les sujets. Ceux qui ont des résultats au-dessus d'un certain degré d'angle de décalage de la verticale au cours des essais avec cadre sont considérés visuo-dépendants. Le score seuil à partir duquel un sujet est considéré dépendant du champ visuel étant discuté dans la littérature, nous nous sommes basés sur la classification de Bagust et al. (2013) qui détermine un effet du cadre et donc une dépendance au champ visuel à partir de trois degrés de décalage par rapport à la verticale absolue. Suite aux analyses statistiques, nous avons choisi d'assouplir ce critère initial à 2 degrés de décalage de la verticale.

1.3.3. Quotient d'empathie

Cet auto-questionnaire permet d'évaluer l'aptitude d'une personne à discerner et à comprendre les sentiments d'autrui ainsi que l'ampleur avec laquelle les émotions l'affectent personnellement (cf. **Annexe 4**). Il a été développé dans sa version originale anglaise, par Simon Baron-Cohen et Wheelwright (2004). La version française a été validée auprès d'un échantillon de 410 étudiants âgés en moyenne de 21 ans (ET = 3,24) (Berthoz et al., 2008).

Ce questionnaire comporte 60 items, dont 40 sont relatifs à l'empathie (exemple : « Je trouve difficile de savoir ce qu'il faut faire dans les relations sociales ») et 20 items sont des items « contrôles » (exemple : « C'est le matin que je suis le (la) plus efficace. »), non cotés, pour vérifier que le participant lit bien les énoncés et pour éviter qu'il ne focalise trop son attention sur l'empathie. Pour chaque item, le participant entoure/coche sur une échelle de Likert à quatre points (« tout à fait d'accord », « plutôt d'accord », « plutôt pas d'accord », « pas du tout d'accord ») la réponse qui lui correspond le mieux. Deux points sont attribués pour « tout

à fait d'accord », 1 point pour « plutôt d'accord » et 0 point pour les autres propositions de réponse sur les items suivants : 1, 6, 19, 22, 25, 26, 35, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 44, 52, 54, 55, 57, 58, 59, 60. Des items inversés marquent 2 points pour les réponses « Pas du tout d'accord » et 1 point pour « Plutôt pas d'accord » et 0 point sur les autres propositions pour les items suivants : 4, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 21, 27, 28, 29, 32, 34, 39, 46, 48, 49, 50. La somme des points donne le quotient d'empathie (EQ) d'un sujet, avec un score maximum de 80 points. Un quotient d'empathie inférieur au score seuil de 30, indique une difficulté à ressentir de l'empathie dans la vie quotidienne.

1.3.4. Évaluation de la charge mentale (NASA-TLX)

Le NASA-TLX (« *NASA Task Load Index* ») est une échelle multidimensionnelle permettant l'auto-évaluation de la charge de travail (cf. **Annexe 5**). Développé à l'origine dans le milieu aéronautique, cet outil est aujourd'hui utilisé dans de nombreux domaines, notamment des facteurs humains (de Winter, 2014) et de la santé (Lowndes et al., 2020; Miyake, 2020).

Il permet d'évaluer **six dimensions** de la charge de travail (Stanton et al., 2005) :

- exigence mentale : permet d'évaluer combien de réflexion, décision ou de calcul ont été nécessaires pour accomplir la tâche ;
- exigence physique : quantité et intensité de l'activité physique requise pour accomplir la tâche ;
- exigence temporelle : quantité de temps nécessaire à l'exécution de la tâche ;
- effort : évalue à quel point le participant doit travailler pour maintenir son niveau de performance ;
- performance : niveau de réussite dans l'accomplissement de la tâche ;
- frustration : degré d'insécurité, de découragement ressenti par le participant pendant la tâche.

Les trois premières dimensions font référence aux demandes imposées à la personne et les autres trois font référence à l'interaction de la personne avec la tâche. Le sujet indique ses réponses sur des échelles de Likert en 20 points allant de « faible » à « fort » ; seule l'échelle pour la dimension « performance » est inversée.

Nous avons choisi d'utiliser les scores bruts des six dimensions de charge de travail tout comme dans d'autres travaux (Cegarra & Morgado, 2009; Wolff et al., 2018). Les conditions d'expérimentation durant les vols paraboliques limitaient la durée de temps disponible pour la

cotation de ce questionnaire. En effet, une procédure de pondération est normalement mise en place afin d'attribuer un coefficient à chaque dimension. Cependant, l'obtention de ce coefficient est plus complexe et l'utilisation des données brutes donne des résultats similaires à ceux obtenus par coefficient (Luximon & Goonetilleke, 2001).

1.4. Hypothèses opérationnelles

Notre hypothèse principale est que la perte des informations sensorielles vestibulaires et proprioceptives provoquée par l'allègement des forces gravitaires en impesanteur simulée facilite les performances de prise de perspective d'autrui lors de la mise en œuvre de transformations mentales égocentrées.

Nos hypothèses opérationnelles sont les suivantes :

Hypothèse 1 : L'impesanteur a un effet facilitateur sur la prise de perspective égocentrée : les performances (temps de réponses (TR) et taux de réponses correctes) dans les conditions critiques « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » de la tâche de prise de perspective sont plus élevées en 0g qu'en 1g (TR plus rapides et taux de réponses correctes plus élevés).

Hypothèse 2 : La charge mentale ressentie au cours de la tâche de prise de perspective est moins importante en 0g qu'en 1g

2.1.: Les scores d'exigence mentale, d'effort mental et de frustration ressentis par les participants au cours de la tâche sont moins élevés en 0g qu'en 1g, et les scores de performance ressentie sont plus élevés en 0g qu'en 1g.

2.2. Les scores d'exigence physique et temporelle sont plus élevés en 0g qu'en 1g

Hypothèse 3 : Les performances dans les conditions de prise de perspective égocentrée des participants visuo-indépendants sont supérieures à celles des participants visuo-dépendants

En 0g, les performances à la tâche de prise de perspective sont supérieures dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » de la tâche de prise de perspective pour les participants visuo-indépendants que pour les participants visuo-dépendants.

Hypothèse 4 : Les capacités d'empathie sont corrélées avec les performances de prise de perspective égocentrée

Les scores d'empathie sont corrélés de manière positive aux taux de réponses correctes dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » en 0g.

Variables contrôlées :

- **Contrôle des conditions de la tâche de prise de perspective**

Afin de contrôler que les conditions critiques nécessitent la mise en œuvre de transformations mentales complexes, nous postulons que les performances (temps de réponses et taux de réponses correctes) obtenues aux conditions contrôles soient meilleures que les performances aux conditions critiques de la tâche.

- **Effets de répétition de la tâche**

La répétition de la tâche de prise de perspective avec une passation avant, pendant et après le vol se traduit par une amélioration significative des performances en post-vol par rapport au pré-vol.

- **Effets perturbateurs des conditions de vol**

Les scores d'exigence temporelle et physique sont plus élevés en 1g en vol qu'en post-vol en raison des effets potentiellement perturbateurs associés aux conditions de vol, c'est-à-dire le stress de l'alternance des phases de 0g et 2g, le bruit de l'avion, etc.

1.5. Analyses statistiques

Malgré la médication, un participant (participant 6) a été malade durant le vol et ses données recueillies n'ont pas pu être incluses dans les analyses statistiques qui ont donc été réalisées sur les données recueillies pour 11 participants.

Concernant la tâche de prise de perspective, les données supérieures à 3 écart-types de la moyenne pour chaque condition ont été retirées des analyses. Ces données pouvant correspondre aux essais non terminés lors des transitions entre les différentes phases de gravité (hypergravité / 0g / 1g) au moment de stopper le test ou des essais où les participants étaient contraints d'arrêter pour raisons diverses (nausées dues au vol, etc.).

L'analyse des temps de réponses moyens (temps de réponse pour les réponses correctes et incorrectes cumulés) par participant permet d'augmenter le nombre de données et de réduire la variabilité intra-individuelle.

Les tests de normalité de distribution des temps de réponse et des taux de réponses correctes dans la tâche de prise de perspective révèlent que les données ne s'écartaient pas de manière significative d'une distribution normale (tests de Shapiro-Wilk, $p > .05$ pour toutes les conditions). Cependant, il est important de noter que les tests de normalité peuvent ne pas avoir le pouvoir de rejeter l'hypothèse nulle de normalité lorsqu'ils sont effectués sur un échantillon de petite taille. En conséquence, les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de tests non paramétriques, c'est-à-dire le test de Friedman (comparaison d'échantillons appariés) suivi, si celui-ci est significatif, d'analyses post-hoc de Durbin-Conover (comparaisons multiples). Le test de rang signé de Wilcoxon a été appliqué lors de la comparaison de deux moyennes d'échantillons appariés. Les relations entre performances et perception de la charge mentale ont été testées à l'aide du test de corrélation de Spearman.

Tous les tests étaient unilatéraux. Nous avons considéré que les valeurs $p < 0.05$ étaient significatives.

2. Résultats

2.1. Tâche de prise de perspective

Nous rappelons les conditions contrôles et critiques de cette tâche ci-dessous (cf. **Figure 32**).

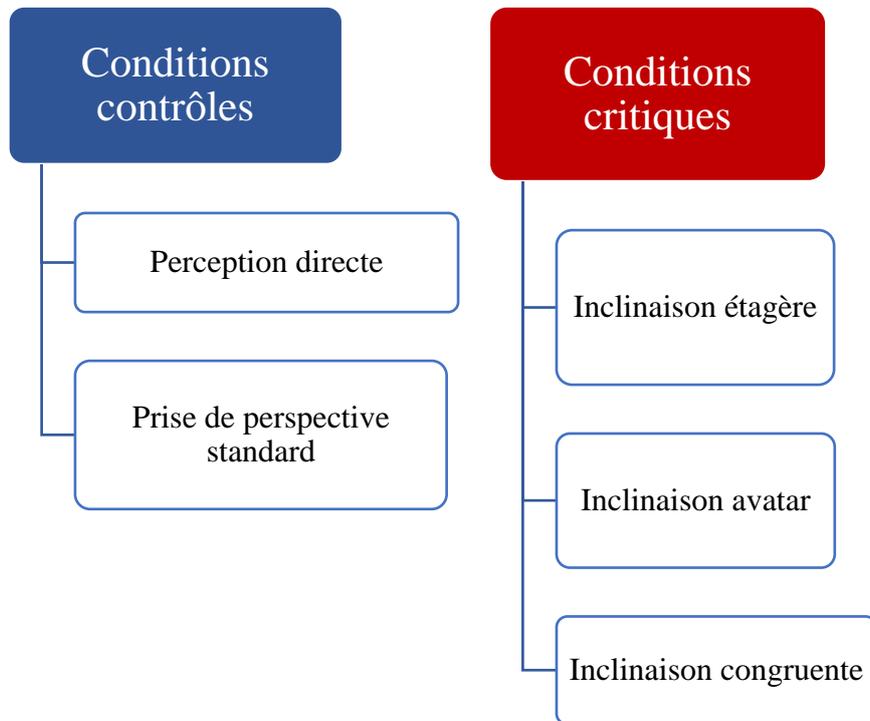


Figure 32 : Schéma des conditions contrôles et critiques de la tâche de prise de perspective

2.1.1. Ligne de base : analyse de la tâche de prise de perspective en pré-vol

L'analyse des données recueillies en pré-vol permet de comparer les conditions contrôles aux conditions critiques afin de vérifier que la tâche utilisée met bien en jeu des prises de perspective :

- Dans la condition prise de perspective standard, le participant réalise une transformation mentale de 180° de sorte que ses temps de réponses moyens seraient plus élevés que dans la condition contrôle sans prise de perspective (perception directe).
- Dans les trois conditions critiques, le participant réaliserait des transformations supplémentaires dans le plan frontal, soit selon un cadre allocentré (étagère inclinée) soit dans le plan égocentré (avatar incliné), entraînant des temps de réponse supérieurs à ceux observés dans les conditions contrôles.

En pré-vol, les temps de réponses (TR) varient significativement entre les cinq conditions (contrôles et critiques) au test de Friedman ($\chi^2(4) = 13.4$; $p = 0.009$). Les analyses post-hoc de comparaison par paires (Durbin-Conover) ne montrent pas de différences significatives entre les deux conditions contrôles ($p = 0.605$) (cf. **Figure 33**).

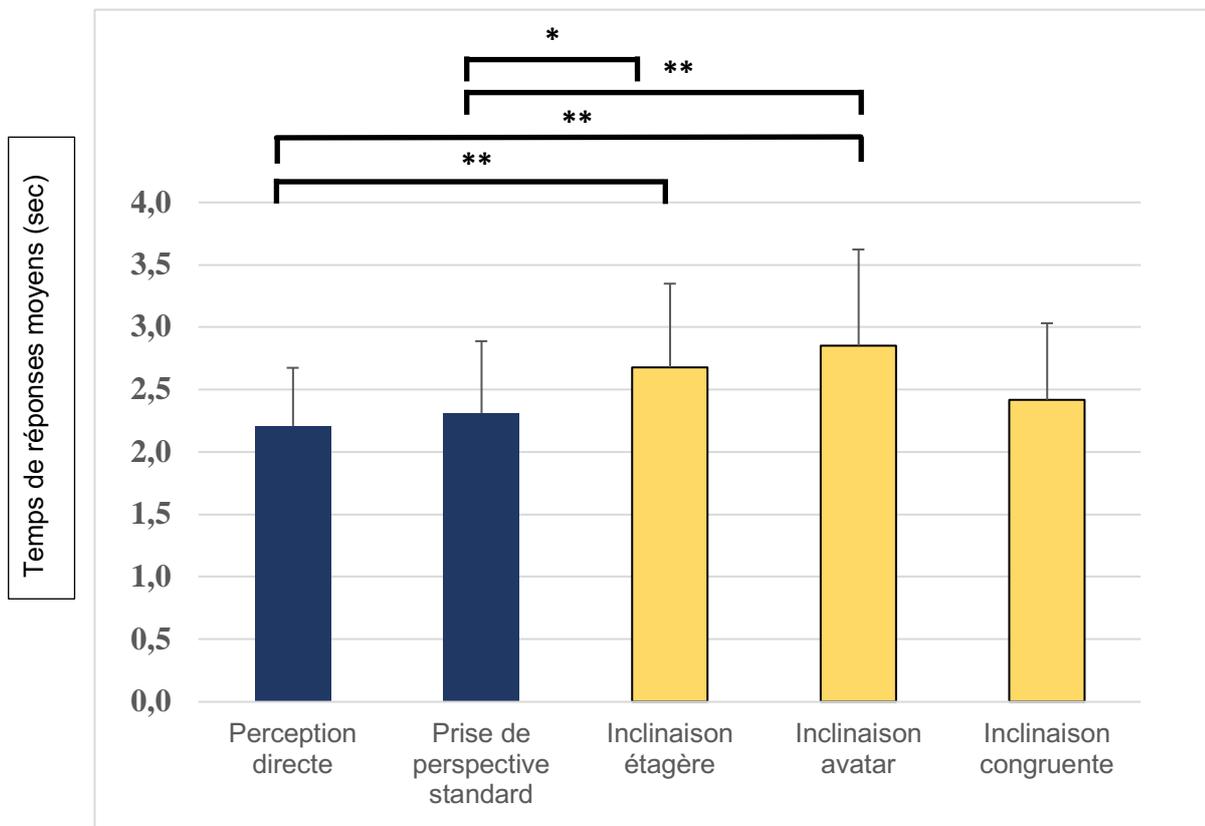


Figure 33 : Temps de réponse moyens et écart-type (ET) (en secondes) des participants pour chaque condition de la tâche de prise de perspective au cours de la phase de pré-vol au sol (* $p < .05$; ** $p < .01$). Les conditions contrôles sont les bâtonnets bleus et les conditions critiques les bâtonnets jaunes.

Cependant, les TR sont significativement plus courts pour les conditions contrôles que pour les conditions critiques « inclinaison étagère » et « inclinaison avatar » ($p < .05$ pour les 4 comparaisons) (cf. Figure 35). Par ailleurs, les TR de la condition « inclinaison congruente » ne diffère pas significativement des 2 conditions contrôles et des 2 autres conditions critiques ($p > .05$). Les TR dans cette condition sont intermédiaires entre les conditions contrôles et les deux autres conditions critiques.

Les taux de réponses correctes (% moyen) ne varient pas significativement entre les cinq conditions ($\chi^2(4) = 6.64$; $p = 0.249$) (cf. **Figure 34**).

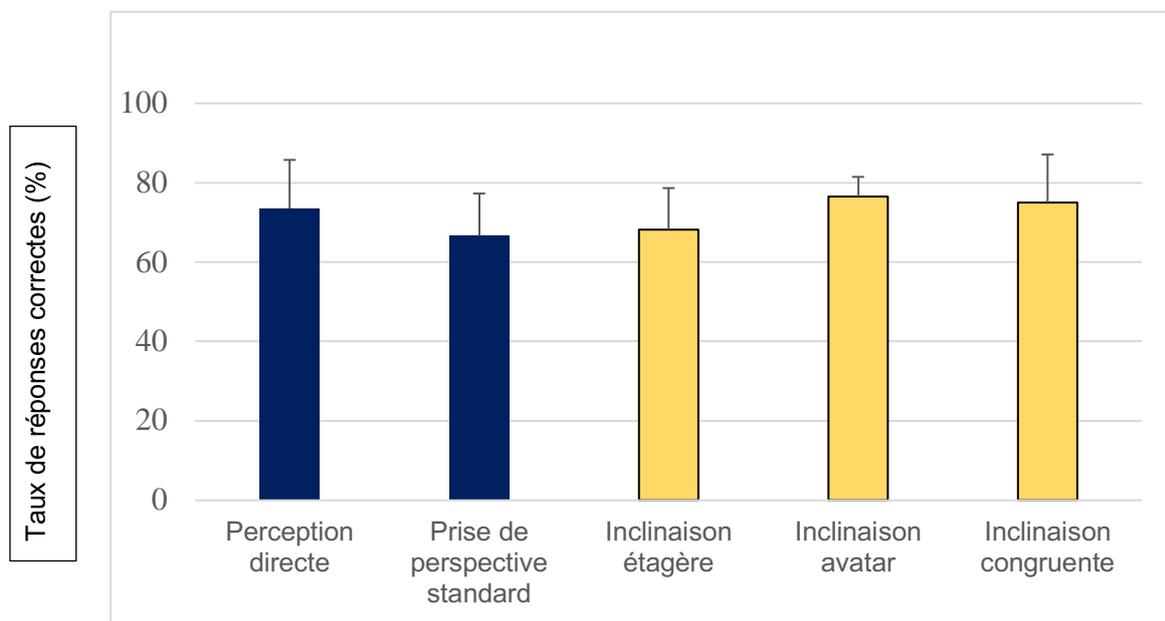


Figure 34 : Taux moyens de réponses correctes et ET (%) des participants pour chaque condition de la tâche de prise de perspective au cours de la phase de pré-vol au sol. Les conditions contrôles sont les bâtonnets bleus et les conditions critiques les bâtonnets jaunes.

Cette analyse en pré-vol permet de dissocier, en partie, les conditions contrôles des conditions critiques à partir des temps de réponse moyens dans les différentes conditions expérimentales. Les taux de réponses correctes ne varient pas significativement entre les cinq conditions de la tâche de prise de perspective suggérant que les temps de réponses seraient un indicateur plus sensible de la difficulté de réalisation de la tâche.

2.1.2. Effet de la répétition de la tâche : comparaison pré- et post-vol

➤ Analyse des temps de réponse

Les comparaisons par paires (test des rangs signés de Wilcoxon) montrent des TR plus courts en post-vol qu'en pré-vol dans les conditions contrôles ($p < .005$ pour les deux comparaisons) et dans les conditions critiques « inclinaison étagère » ($p < .001$) et « inclinaison avatar » ($p = 0.025$) (cf. **Figure 35**).

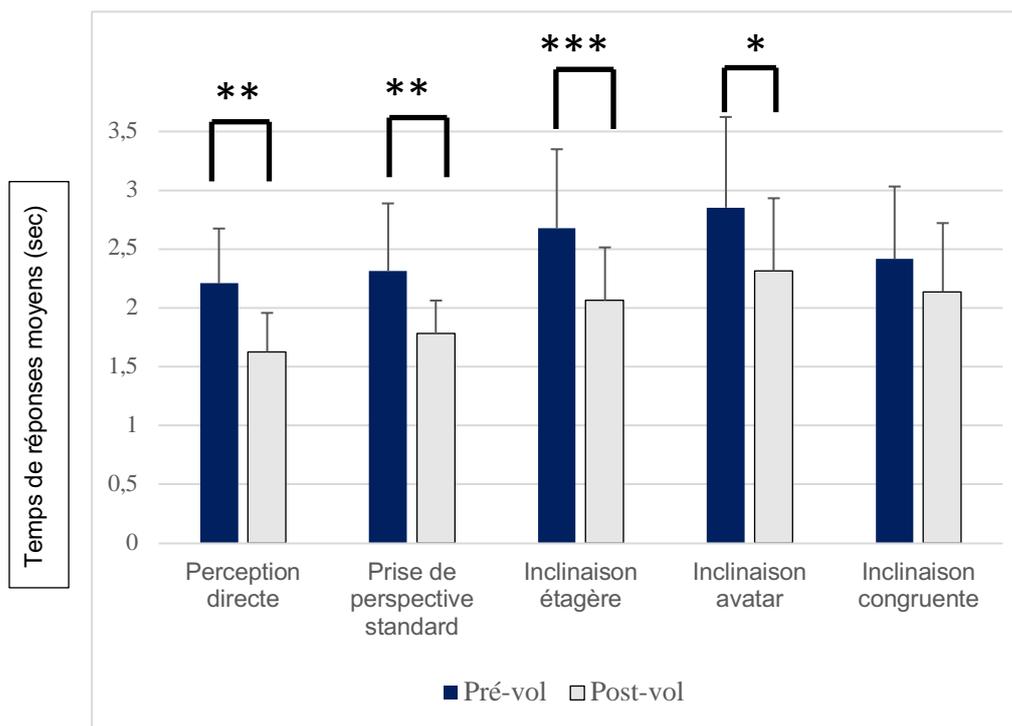


Figure 35 : Temps moyens de réponse et ET (secondes) dans chaque condition de la tâche de prise de perspective en phases de pré-vol et de post-vol ($p < .05^*$; $p < .01^{**}$; $p < .001^{***}$).

➤ Analyse des taux de réponses correctes

L'analyse des rangs signés de Wilcoxon montre des taux de réponses correctes significativement plus élevés en post-vol qu'en pré-vol dans les conditions contrôles ($p < .007$ pour les 2 comparaisons). En revanche, pour les conditions critiques, aucune différence significative entre les données pré- et post-vol n'a été obtenue ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 36**).

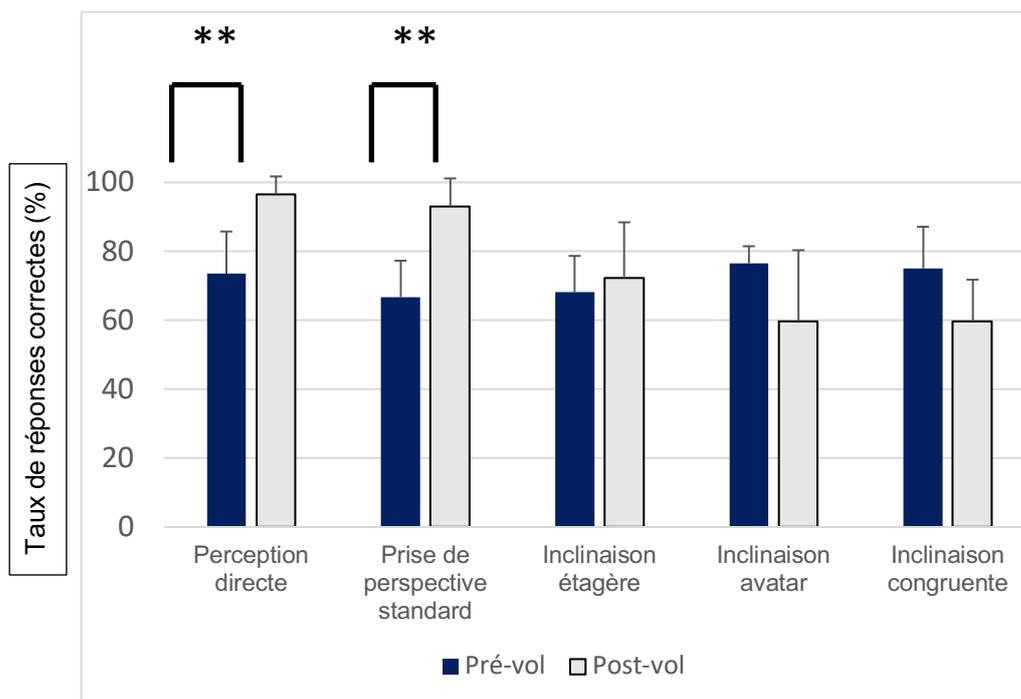


Figure 36 : Taux de réponses correctes (%) dans chaque condition dans la tâche de prise de perspective en phases de pré-vol et de post-vol ($p < .01^{**}$).

Les analyses montrent qu'il existe un effet de répétition de la tâche avec des TR significativement plus rapides dans toutes les conditions hormis la condition « inclinaison congruente ». Concernant les taux de réponses correctes, cet effet d'apprentissage s'observe cependant uniquement dans les conditions contrôles avec des taux de réponses correctes significativement plus élevés en post-vol qu'en pré-vol. Au contraire, on observe dans les conditions critiques « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente », des taux de réponses correctes plus faibles en post-vol qu'en pré-vol.

2.1.3. Effet des conditions du vol : comparaison 1g en vol et post-vol

Les analyses de comparaison par paires (rangs signés de Wilcoxon) révèlent que les temps de réponse recueillis lors des phases de **1g en vol et en post-vol ne diffèrent pas significativement pour aucune condition de la tâche** ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 37**). Il en est de même pour les taux de réponses correctes ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 38**).

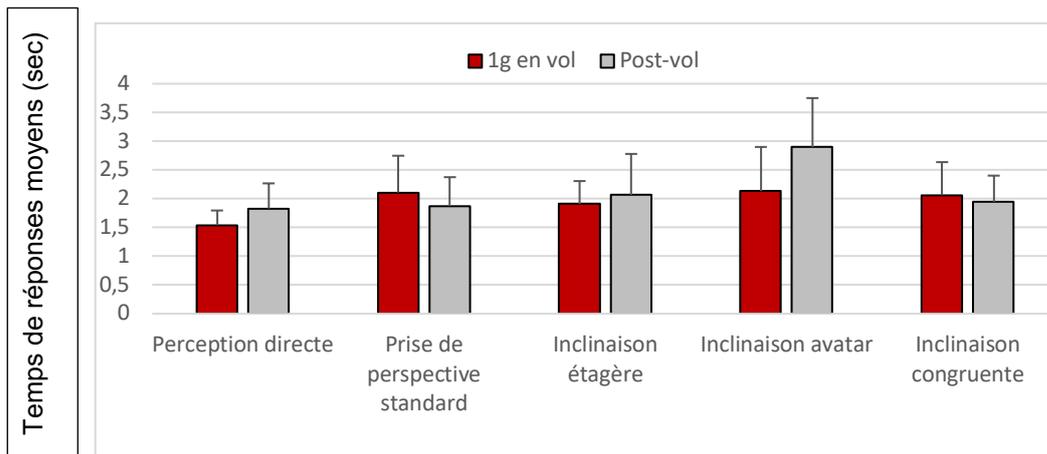


Figure 37: Temps moyens de réponse et ET (secondes) dans chaque condition de la tâche de prise de perspective lors des sessions de 1g en vol et en post-vol.

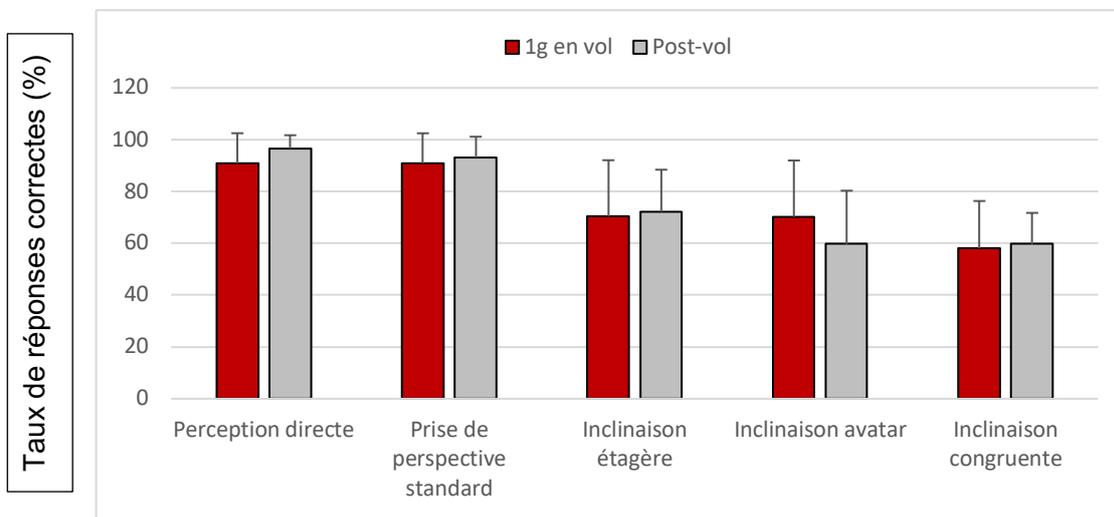


Figure 38 : Taux de réponses correctes (%) et ET dans chaque condition dans la tâche de prise de perspective en phases de 1g en vol et post-vol.

En revanche, la **Figure 39** suggère que l'exigence physique et temporelle étaient ressenties comme étant plus fortes en vol qu'au sol. Les analyses statistiques ont montré que le taux d'exigence physique ressentie par les participants au cours de la tâche de prise de perspective est, en effet, significativement plus élevé en 1g en vol qu'en post-vol au sol ($p = 0.025$), alors

que le taux d'exigence temporelle ne diffère pas significativement entre les périodes de 1g en vol et post-vol ($p > .05$).

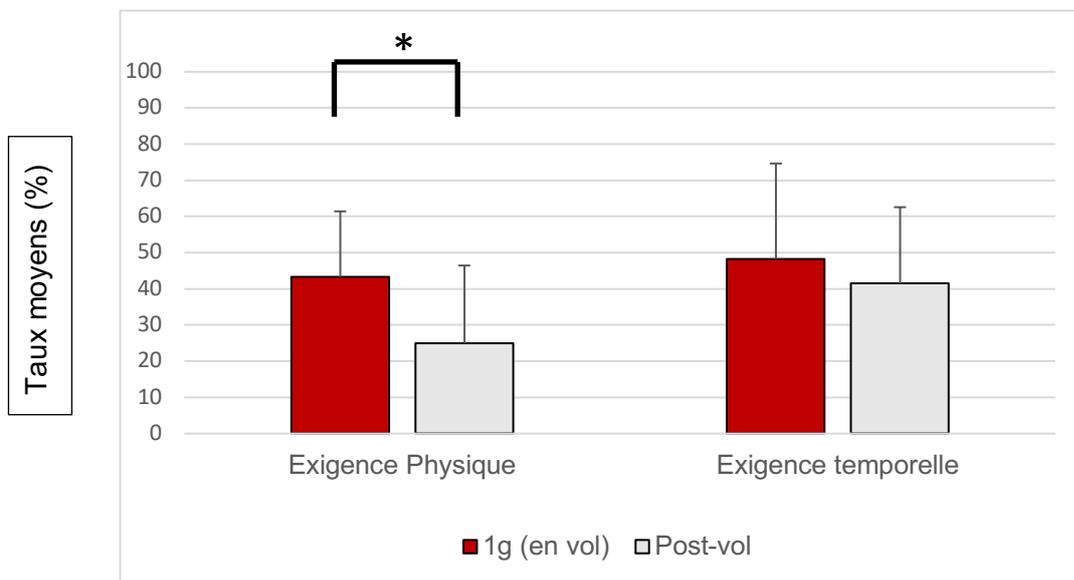


Figure 39 : Taux moyens et ET (%) d'exigence physique et temporelle ressentis par les participants au cours de la tâche de prise de perspective en 1g en vol et post-vol ($p < .05^*$)

2.1.4. Comparaison des performances en 0g et 1g : effet de l'impesanteur

Le nombre d'essais réalisés par les participants au cours des phases de 1g en vol étant moins élevé qu'en post-vol au sol et les performances n'étant pas significativement différentes entre ces deux périodes de 1g, nous avons cumulé les données obtenues en 1g en vol et en post-vol afin de réduire la variabilité intra-individuelle au cours des analyses comparatives entre 0g et 1g.

➤ Analyse des temps de réponses

Les comparaisons au test des rangs signés de Wilcoxon montrent des **temps de réponses significativement plus courts en 0g qu'en 1g uniquement pour les conditions critiques** (inclinaison étagère, avatar et congruente, respectivement $p = 0.027$; $p = 0.048$; $p = 0.007$) (cf. **Figure 40**).

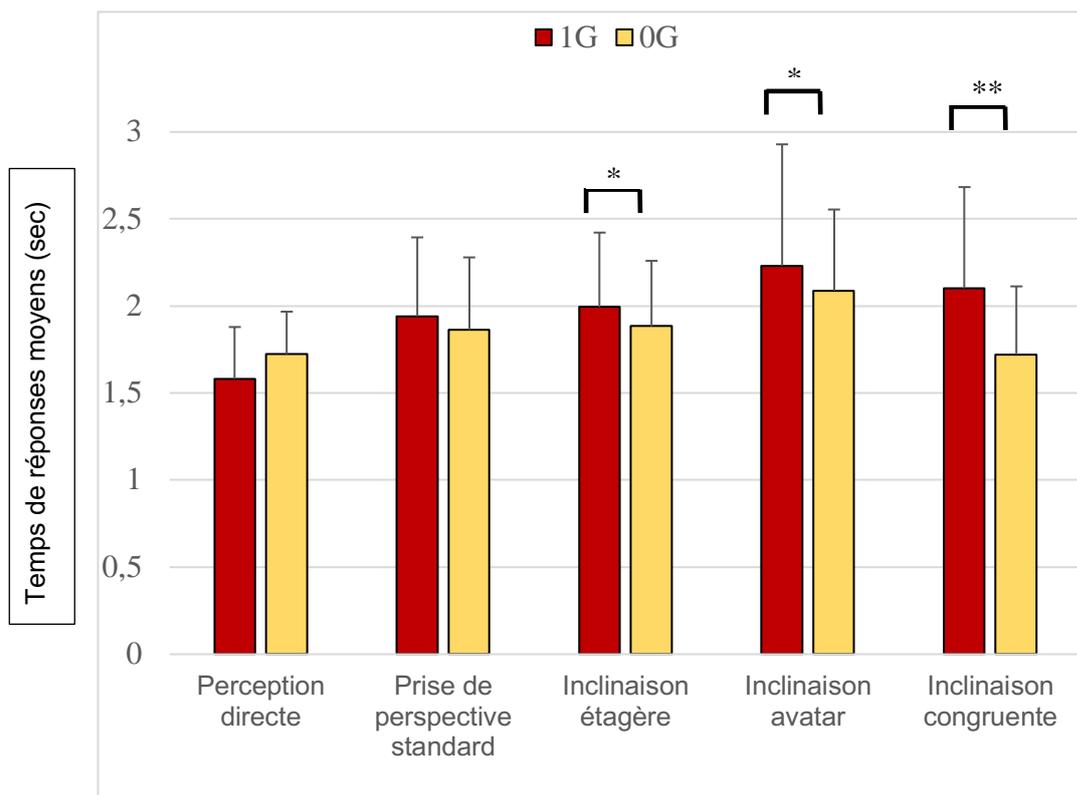


Figure 40 : Temps de réponses moyens et ET (en secondes) pour chaque condition de la tâche de prise de perspective en 0g et en 1g (données 1g en vol + post-vol) ($p < .05^*$; $p < .01^{**}$)

➤ **Analyse des taux de réponses correctes**

Les comparaisons par paires (rangs signés de Wilcoxon) n'ont pas montré de différences significatives des taux de réponses correctes entre les phases de 1g (en vol et post-vol) et 0g ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 41**). On remarque cependant que les taux de réponses correctes dans la condition « inclinaison avatar » sont plus élevés en 0g qu'en 1g.

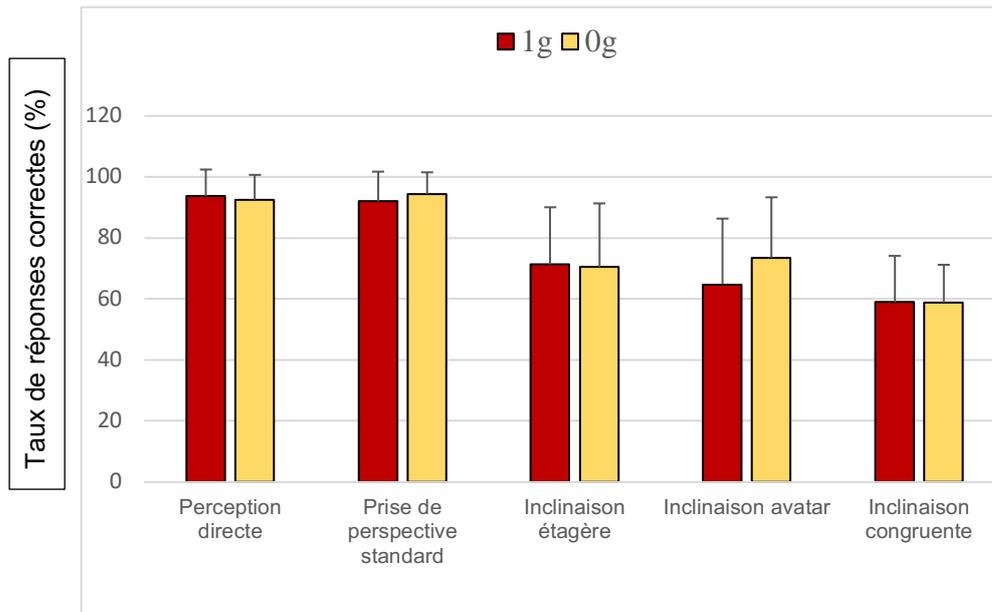


Figure 41 : Taux de réponses correctes et ET (%) pour chaque condition de la tâche de prise de perspective entre les phases de 1g (en vol et post-vol) et 0g

2.2. Effet de l'impesanteur simulée sur la charge mentale lors de la tâche de prise de perspective d'autrui

Contrairement à notre hypothèse, les comparaisons par paires (Wilcoxon) montrent que les taux d'exigence mentale et d'effort mental perçus par les participants sont au contraire significativement plus élevés en 0g qu'en 1g (respectivement, $p = 0.007$ et $p = 0.018$) alors que les scores de performance ne diffèrent pas significativement entre les deux sessions 0g et 1g ($p > .05$) (cf. **Figure 42**).

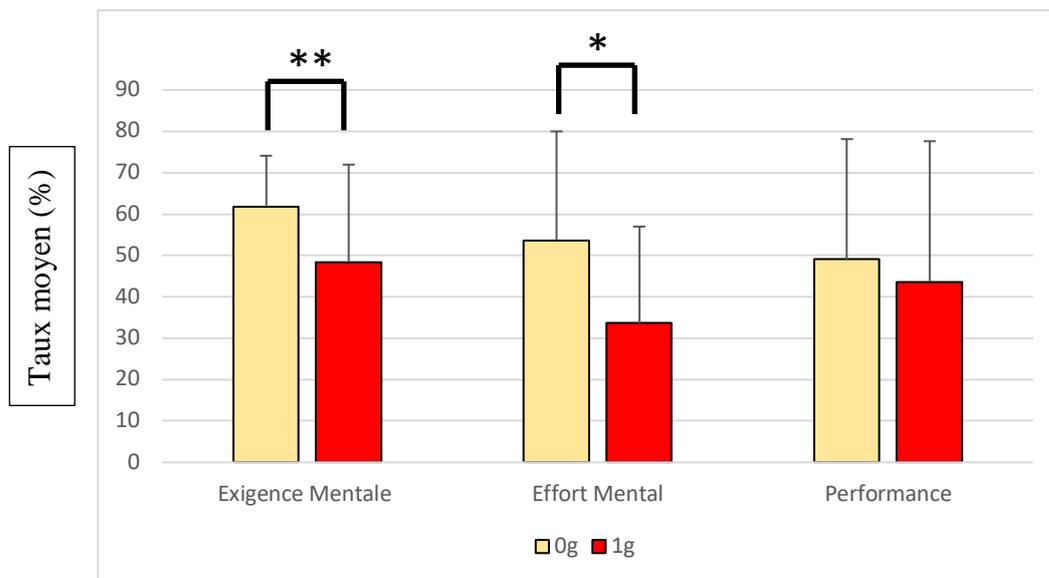


Figure 42 : Taux moyens et ET (%) d'exigence mentale, d'effort mental et de performance ressentis par les participants au cours de la tâche de prise de perspective en 0g et 1g ($p < .01^{**}$; $p < .05^*$).

Les analyses de Wilcoxon montrent que les taux d'exigence temporelle perçue par les participants est significativement plus élevée en 0g qu'en 1g ($p = 0.007$). Les taux d'exigence physique et de frustration ne varient pas significativement entre les deux sessions 0g et 1g ($p > .05$) (cf. **Figure 43**).

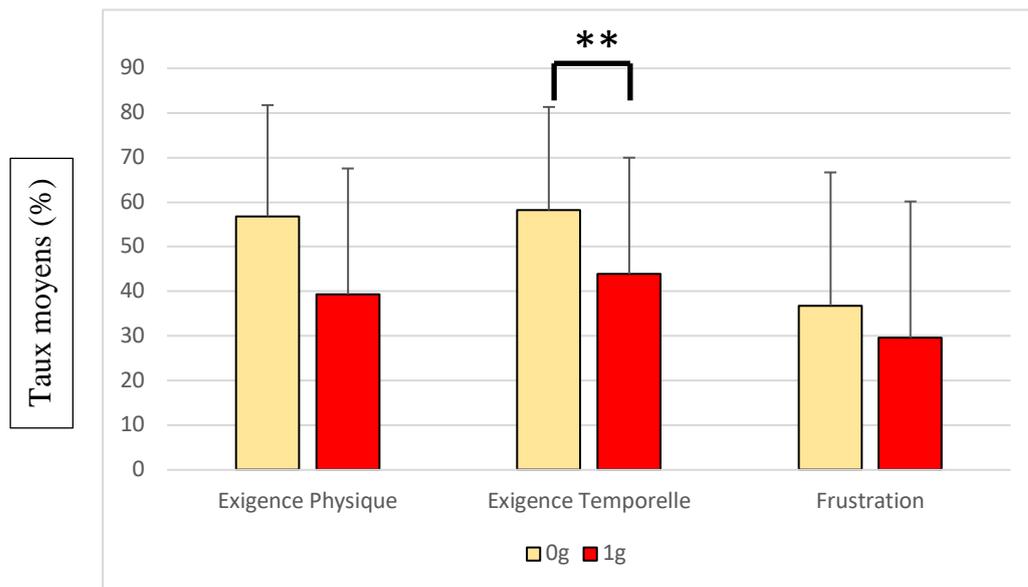


Figure 43 : Taux moyens (%) d'exigence physique, temporelle et de frustration ressentis par les participants au cours de la tâche de prise de perspective en 0g et 1g ($p < .01^{**}$).

2.3. Influence du style cognitif (analyse du RFT)

Nous testons l'hypothèse que les participants visuo-indépendants ont des temps de réponses plus longs et des taux de réponses correctes plus faibles dans les conditions de la tâche de prise de perspective « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » en 0g.

Nous avons classé les participants en deux groupes en fonction de leurs résultats au RFT :

- les participants visuo-dépendants ne sont pas impactés par le cadre incliné pour aligner la baguette à la verticale ;
- les participants visuo-indépendants, les participants ne seraient pas impactés par le cadre.

Le degré de décalage de la baguette par rapport à la verticale, pour chaque participant et dans les deux orientations (gauche/droite) a été calculé pour la condition sans cadre (cf. **Tableau 2**) et dans la condition avec cadre (cf. **Tableau 3**).

Tableau 2 : Degré de déviation moyen par rapport à la verticale pour chaque participant dans la condition sans cadre (inclinaison de la baguette de 40° à gauche ou à droite)

SUJETS	Degré de déviation de l'angle – essais sans cadre	
	Inclinaison de la baguette à gauche	Inclinaison de la baguette à droite
1	-0,24	-0,02
2	2,82	2,16
3	2,1	1,44
4	-1,5	-1,4
5	0,52	1,32
7	0,58	1,4
8	2,34	1,4
9	1,22	0,8
10	0,86	1,18
11	0,6	0
12	-0,42	-1,16

Tableau 3 : Degré de déviation moyen par rapport à la verticale pour chaque participant dans la condition avec cadre (inclinaison de la baguette et du cadre).

SUJETS	Inclinaison du cadre (+/-18°) et de la baguette (+/-20°)			
	DD (+18° ; +20°)	GD (-18° ; +20°)	DG (+18° ; -20°)	GG (-18° ; -20°)
1	-1,16	-2,67	-0,8	-3,45
2	1,13	2	2,2	2,2
3	0,75	0,5	1,73	2,1
4	-0,33	-1,3	0,2	-0,3
5	-1,3	0,4	-1,4	-0,5
7	2,53	0,95	2,07	0,9
8	-2,25	1,3	1,55	2,43
9	2	2,2	1,73	0,07

10	0,43	0,85	1	-0,6
11	1,1	-3,65	0,65	-1,76
12	-1,23	-2,2	-1,65	-1,53

La comparaison des données obtenues dans les deux conditions révèle six sujets dont le décalage de la baguette par rapport à la verticale est supérieur à deux degrés par rapport aux angles de déviation sans cadre. Ils seraient ainsi dépendants du champ visuel tandis que les 5 autres participants seraient indépendants du champ visuel.

Nous avons comparé les taux de réponses correctes et les temps de réponses des deux sous-groupes de participants respectivement visuo-indépendants et visuo-dépendants en 0g, en cumulant les données des conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente », après avoir vérifié qu'il n'existe pas de différences significatives entre les données obtenues dans ces deux conditions ($p > .05$).

Les comparaisons par paires ont montré des temps de réponses plus rapides pour le groupe de participants visuo-indépendants en 0g ($p = 0.032$) (cf. **Figure 44**). Cependant, aucune différence significative n'a été montrée pour les taux de réponses correctes entre chaque groupe ($p > .05$) (cf. **Figure 45**).

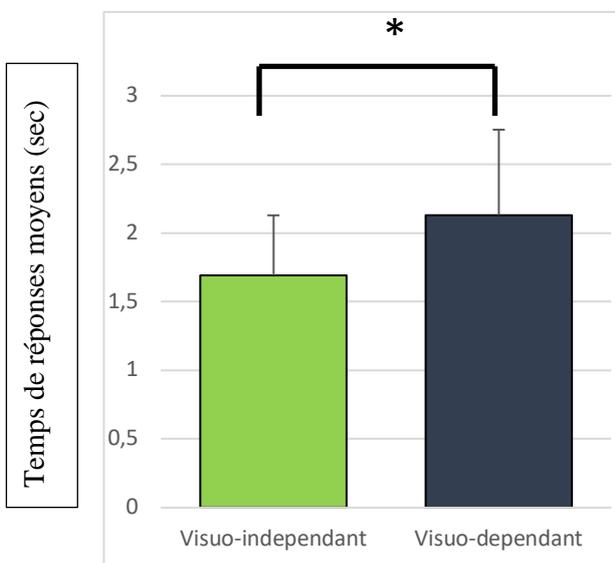


Figure 44 : Temps de réponses moyens et ET (sec) des deux sous-groupes de participants visuo-indépendants et visuo-dépendants dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » regroupées en 0g ($p < .05^*$).

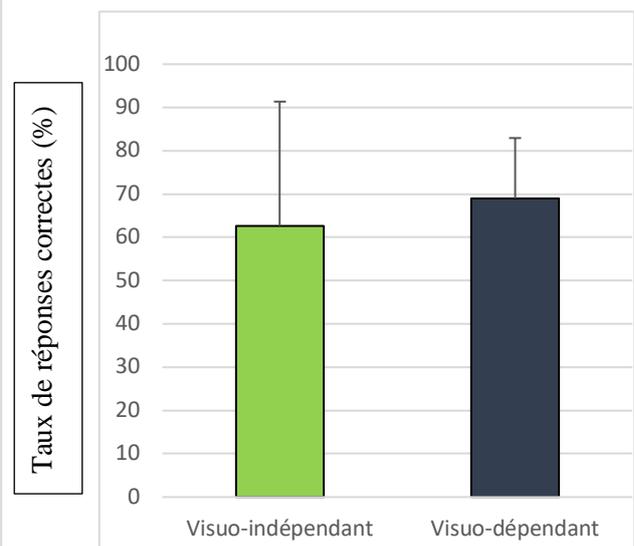


Figure 45 : Taux de réponses correctes et ET (%) des deux sous-groupes de participants visuo-indépendants et visuo-dépendants dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » regroupées en 0g.

2.4. Influence du niveau d'empathie sur les performances de prise de perspective

L'hypothèse d'une relation positive amélioration le quotient d'empathie et le taux de réponses correctes dans la tâche de prise de perspective dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » a été proposée.

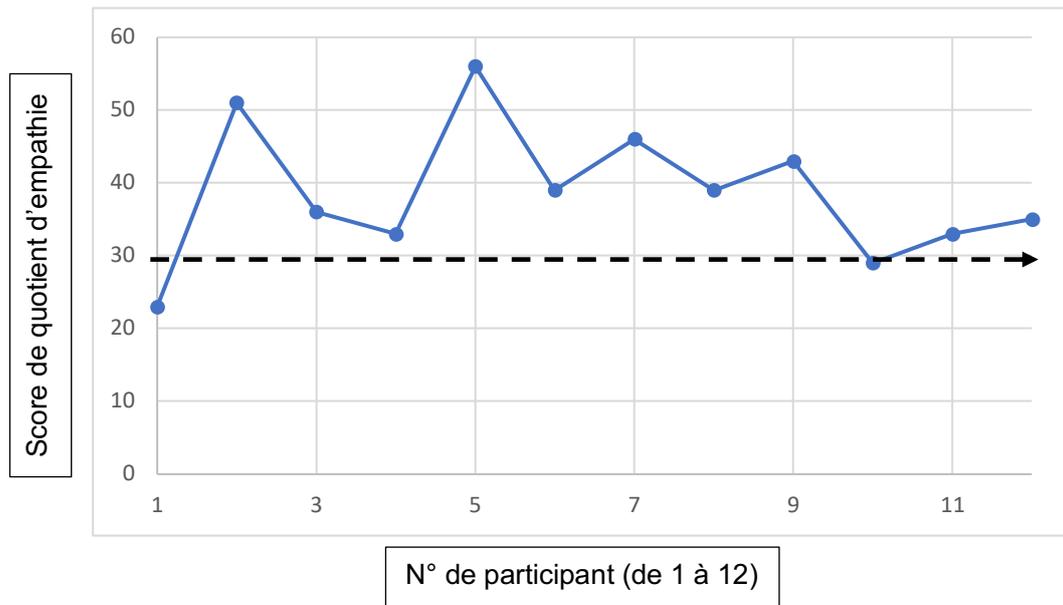


Figure 46 : Score individuel de quotient d'empathie pour chaque participant. Score seuil (30) représenté par des pointillés. Deux participants se situent en dessous du score seuil de 30 : les participants 1 et 10 avec respectivement 23 et 29 de QE.

Une corrélation négative entre le quotient d'empathie et les taux de réponses correctes est obtenue dans la condition « inclinaison avatar » à la fois en 1g en vol ($\rho = -0.682$; $p = 0.010$) et en 0g ($\rho = -0.724$; $p = 0.006$), contrairement aux corrélations positives entre le niveau d'empathie et les performances qui étaient attendues dans notre hypothèse.

3. Discussion

La première expérience, réalisée en vol parabolique, a permis de tester l'impact de la perturbation du système vestibulaire au cours d'une tâche expérimentale de prise de perspective d'autrui dans des conditions nécessitant de recourir à un cadre de référence égocentré. Nous avons proposé que l'impesanceur a un effet facilitateur sur la prise de perspective égocentrée avec des performances plus élevées en 0g qu'en 1g dans les conditions critiques « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » de la tâche de prise de perspective (temps de réponses plus rapides et taux de réponses correctes plus élevés). En adéquation avec cette première hypothèse, nous avons testé l'hypothèse que la charge mentale ressentie par les participants était moins importante en 0g qu'en 1g au cours de la tâche de prise de perspective.

Nos résultats montrent des temps de réponses **significativement plus rapides en 0g** dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » dans la tâche de prise de perspective par rapport aux temps de réponses obtenus en 1g. Il en est de même dans la condition « inclinaison étagère » dans laquelle les temps de réponse sont également plus rapides en 0g qu'en 1g. Par ailleurs, les taux de réponses correctes n'ont pas varié de manière significative dans aucune des conditions entre les phases de 0g et 1g. Les temps de réponses sont donc plus rapides uniquement dans les conditions critiques de la tâche de prise de perspective.

Ces résultats vont partiellement dans le sens de notre hypothèse. En effet, nous supposons que cette facilitation en 0g dans les conditions critiques impliquerait un traitement plus rapide de l'information par rapport aux conditions en 1g. En 0g, le système vestibulaire subit une perturbation et ne reçoit plus les informations relatives à la perception de l'orientation du corps dans l'espace, seuls certains indices proprioceptifs demeurent stables dans notre étude notamment les indices de pression du siège sur lequel est assis le participant (Cheung et al., 1990; Lackner, 1992). Nous supposons que le participant utilise une représentation incarnée de l'avatar en se positionnant de façon imaginaire dans la position de celui-ci. La représentation sensori-motrice de leur propre corps serait compromise car les indices sensoriels ne concorderaient pas avec la verticale gravitaire habituelle. Ainsi le participant aurait plus de facilités de prendre le point de vue relatif à l'avatar et non celui de sa propre perspective. Cependant les taux de réponses correctes ne varient pas pour autant ce qui peut signifier que la tâche est résolue de la même façon en 0g qu'en 1g. Le traitement de la perspective d'autrui serait donc cognitivement moins exigeant en 0g et permettrait d'aboutir plus rapidement à la résolution de la tâche. Prendre la perspective d'autrui quand celui se

trouve dans des positions inhabituelles serait moins coûteux sur le plan cognitif lorsque la représentation sensorielle de son propre corps serait dégradée en raison des entrées sensorielles réduites. Ainsi, les participants auraient moins de difficultés à se projeter dans une représentation mentale incarnée d'autrui car ils s'appuieraient directement sur les axes du corps de celui-ci au lieu de prendre en compte en amont leur perspective propre (Amorim et al., 2006; Samson et al., 2010). Cela pourrait ainsi expliquer la facilitation observée dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » de la tâche de prise de perspective.

Contrairement à ce que nous avons supposé, nous avons également observé cette facilitation des temps de réponses dans la condition « inclinaison étagère » en 0g. Cette condition nécessitait d'avoir recours à un cadre de référence allocentré pour résoudre la tâche, car seule l'étagère était inclinée et le « bas » de l'étagère était indiqué par un repère spécifique. Zacks et al. (2002) ont montré que lorsqu'un repère visuel vertical est présent et qu'il s'agit d'un objet ayant subi une rotation, alors le recours à un cadre de référence allocentré est habituellement favorisé. Le vol parabolique est un environnement inhabituel pour les participants, bien qu'ils devaient avoir déjà au moins une expérience en 0g en amont de notre expérimentation. Selon les théories de la cognition incarnée, le participant doit « donner du sens » à la situation rencontrée afin de résoudre une tâche dans un contexte social, en s'appuyant sur les indices environnementaux, notamment sensoriels (Laroche, 1996). Oman (2003) rapporte que des membres d'équipage en vol spatial identifiaient la surface qu'ils voyaient sous leurs pieds comme un sol, la vision du corps constituant donc un axe de référence sur lequel ils s'appuyaient, en interprétant le « bas » comme dans la direction des pieds (Howard & Hu, 2001). L'appui sur les indices visuels est donc prépondérant en vol spatial (Young et al., 1986). Or, dans la situation expérimentale présente, les indices visuels se limitent à ceux de la scène projetée dans le casque de réalité virtuelle, de sorte que l'axe de référence corporel n'est pas perçu par les participants sur le plan visuel. (Colombo et al., 2017; Iachini et al., 2009). Or, dans la condition « inclinaison étagère » comme dans les autres conditions, nous demandons aux participants de prendre le point de vue de l'avatar, ce qui pourrait expliquer le recours à un cadre de référence égocentré pour réaliser la tâche même dans cette condition, car celui-ci serait moins coûteux à mettre en place sur le plan cognitif (Zacks et al., 2002).

Cependant, les participants ressentent l'exigence temporelle comme étant significativement plus importante en 0g qu'en 1g en vol. Il convient d'être prudent car la facilitation des temps de réponses observée pourrait être simplement due à une pression que s'imposent les participants de répondre plus rapidement à la tâche car les phases d'impesanteur ne durent que 22 secondes alors que la passation de la tâche de prise de perspective pour les phases

de 1g en vol s'effectue au cours des pauses de cinq minutes entre deux séries de paraboles au cours du vol, ce qui pourrait expliquer les temps de réponses plus rapides en 0g qu'en 1g dans toutes les conditions critiques. Par ailleurs, il pourrait également s'agir d'une modification de la réponse motrice, ou sensorimotrice, en 0g. Ainsi, des études montrent par exemple que des dessins sont exécutés plus rapidement en 0g qu'en 1g (Clément et al., 2009). Néanmoins, si une facilitation sensorimotrice s'était produite dans la présente expérience, une diminution des temps de réponses aurait été observée dans toutes les conditions de la tâche de prise de perspective. Cependant, nous n'avons pas inclus de condition contrôle afin de tester cette éventualité. Une tâche de pointage, comme celle utilisée dans l'étude de Bestaven et al. (2016) aurait permis d'évaluer à la fois le temps de réaction et également la durée du mouvement.

Nos résultats ont également montré que l'exigence mentale et l'effort mental perçus par les participants en 0g sont significativement plus élevés qu'en 1g. Cela ne vient pas confirmer notre hypothèse car nous nous attendions à une charge de travail moins élevée en 0g en lien avec la facilitation des performances. Bien que Steinberg et al. (2015) n'avaient pas observé une charge mentale plus élevée entre les phases de 0g et 1g, ils avaient montré une augmentation significative du niveau de cortisol, hormone présente en cas de stress, entre le début et la fin des paraboles. Il est probable que le niveau de stress est augmenté en 0g, dû au caractère inhabituel de la situation. Cependant, Friedl-Werner et al. (2021) ont montré que des niveaux élevés de cortisol n'ont pas influencé les temps de réactions dans une tâche de Go/No-Go. S'imaginer se projeter à la place d'un avatar incliné est inhabituel et cela davantage en 0g, ce sont des situations qui ne peuvent pas être rencontrées sur Terre et peuvent altérer la perception des performances perçues par les participants, car ces situations ne correspondent pas aux expériences déjà rencontrées et stockées en mémoire à long terme (Samson et al., 2010). De plus, l'exigence et l'effort mental perçus peuvent être liés au stress provoqué par l'environnement de 0g. Cependant, le niveau d'anxiété au cours de la réalisation de la tâche en 0g n'était probablement pas élevé car les temps de réponse sont améliorés alors qu'un niveau d'anxiété élevé est associé souvent à des temps de réaction plus lents (Friedl-Werner et al., 2021). Cependant ces traits d'anxiété peuvent être nuancés par des différences interindividuelles et donc une capacité d'adaptation à cet environnement d'impesanteur simulée propre à des traits de personnalité spécifiques (Collado et al., 2017).

Par ailleurs, les niveaux de gravité au cours du vol parabolique sont rapidement modifiés avec les manœuvres alternant les trois phases de 1g, 0g et 2g. Comme Stahn et al. (2020) l'ont montré les performances cognitives peuvent également être impactées par les phases d'hypergravité en vol parabolique. En effet, les phases de 0g sont précédées et suivies de phases de 1,8g en vol où le corps est perçu comme étant deux fois plus lourd qu'en gravité

normale (1g). De plus, Clément et al. (1989) ont montré que la position du regard peut se déplacer vers le bas en 0g et se déplacer vers le haut en 1,8 g affectant potentiellement la perception visuelle. Dans ce cas il aurait été intéressant d'utiliser des mesures d'oculométrie pour compléter les résultats obtenus. Par ailleurs, Ferrè et al. (2019) ont montré une augmentation du poids corporel perçu pendant l'expérience d'hypergravité et une diminution de ce dernier lors des phases de 0g. Les modifications de la force de l'accélération gravitationnelle produisent ainsi des changements rapides dans la perception du poids corporel, ce qui conforte l'augmentation perçue par les participants de l'exigence physique ressentie en 1g en vol par rapport à la session en post-vol. Ces auteurs soulignent également que la conscience quotidienne de son propre corps est façonnée par des expériences continues de gravité. La contribution des signaux gravitationnels est donc primordiale à la conscience de soi puisque cette dernière est construite grâce à la force gravitaire qui agit sur le corps et permet d'obtenir des sensations corporelles, proprioceptives et vestibulaires, du corps dans l'espace (Ferrè et al., 2019).

De plus, nous nous attendions à ce que les performances soient modulées par les caractéristiques individuelles, c'est-à-dire le style cognitif de l'individu et son niveau d'empathie. Nous avons testé l'hypothèse qu'en 0g, les participants visuo-indépendants ont de meilleures performances dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » de la tâche de prise de perspective que les participants visuo-dépendants. Notre hypothèse a été confirmée : les résultats révèlent des temps de réponses significativement plus rapides en 0g chez les participants visuo-indépendants que chez les visuo-dépendants dans les conditions qui requièrent la mise en place d'un cadre de référence égocentré. Ces résultats confortent l'idée que les individus visuo-indépendants utiliseraient une représentation incarnée de l'avatar ce qui réduirait le temps de réponses aux conditions qui requièrent l'utilisation d'un cadre de référence égocentré lors de la tâche de prise de perspective d'autrui, plutôt que les indices visuel présents dans l'environnement simulé.

Concernant le niveau d'empathie, nous nous attendions à ce que plus les scores d'empathie soient positivement corrélés avec les taux de réponses correctes dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente », en accord notamment avec Mattan et al. (2015) qui ont montré une modulation positive des performances de prise de perspective à la troisième personne par les traits d'empathie. Or, nos résultats révèlent une corrélation négative entre le quotient d'empathie et le taux de réponses correctes en 0g et en 1g dans la condition « inclinaison avatar ». Ainsi, moins les participants étaient empathiques, mieux ils réussissaient cette condition. L'auto-questionnaire de quotient d'empathie de Baron-Cohen & Wheelwright (2004) propose une évaluation de l'empathie à la fois affective et cognitive sans

dissocier ces dimensions. Étant donné que la prise de perspective d'autrui repose sur la dimension cognitive de la théorie de l'esprit, il conviendrait dans une expérience ultérieure de dissocier ces dimensions afin d'interpréter plus précisément les résultats, en utilisant par exemple la « basic empathy scale » (Jolliffe & Farrington, 2006) qui évalue les dimensions cognitives et affectives d'empathie ou la « cognitive, affective and somatic empathy scale » qui ajoute une dimension somatique (Raine et al., 2022). De plus, les résultats obtenus à l'aide d'un auto-questionnaire peuvent être influencés par un biais de désirabilité sociale des participants qui auraient souhaité se présenter de façon la plus favorable qu'il soit (Chung & Monroe, 2003).

Concernant les limites de cette première expérimentation, il convient d'être prudent dans l'interprétation des résultats pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il s'agit d'un groupe restreint de participants uniquement masculins, ce qui ne permet pas de généraliser les résultats à une population plus large. De plus les phases de 0g sont très courtes (22 secondes) et provoquent des effets physiologiques différents de ceux dans l'ISS qui sont provoqués sur des phases d'exposition de longue durée à l'impesanteur. Par ailleurs, la tâche de prise de perspective a été répétée à plusieurs reprises : en pré-vol, en vol et post-vol. Dans toutes les conditions contrôles et critiques de la tâche, hormis la condition « inclinaison congruente », les **temps de réponses étaient plus rapides en post-vol qu'en pré-vol**. En même temps, les taux de réponses correctes se sont uniquement améliorés dans les conditions contrôles en post-vol. Il existe donc un effet d'apprentissage dans la tâche de prise de perspective pour les temps de réponse qui peut être due à une composante motrice, autrement dit le participant répond plus rapidement car il devient familier avec la tâche. Pour les taux de réponses correctes, cet effet d'apprentissage ne s'observe que dans les conditions contrôles pouvant s'expliquer par la facilité de ces conditions car ce sont des situations de perception directe et de prise de perspective standard habituellement rencontrées sur Terre, comparativement aux conditions critiques.

Dans cette première expérimentation, les processus cognitifs non-sociaux n'ont pas pu être évalués car la durée des phases d'impesanteur en 0g est limitée, de même que des mesures physiologiques telles que l'oxymétrie cérébrale ne pouvaient être envisagées. L'immersion sèche est un modèle d'impesanteur simulée sur une durée plus importante et continue afin de provoquer le déplacement des fluides physiologiques vers le haut du corps comme lors de vols spatiaux. L'objectif de la seconde expérimentation est donc d'observer si la facilitation dans les capacités de prise de perspective d'autrui observée en 0g au cours du vol parabolique est un effet spécifique à la prise de perspective d'autrui ou serait liée à d'autres fonctions

cognitives impliquées. Par ailleurs, nous introduisons également des mesures physiologiques d'oxymétrie cérébrale (NIRS) et d'oculométrie.

EXPÉRIENCE 2 :

Perturbation des entrées somatosensorielles en condition d'immersion sèche : effet d'une contre-mesure

La première étude en immersion sèche en France a été réalisée par le CNES dans les locaux de la clinique spatiale à Toulouse (CHU de Rangueil) en Février 2015, 12 participants avaient séjourné pendant 3 jours en immersion sèche, et seuls des paramètres physiologiques étaient étudiés pour appréhender les effets de l'impesanteur sur la perte de masse, de force musculaire et également sur les effets cardiaques et vasculaires. Dans cette seconde étude en immersion sèche, également réalisée par le CNES et plusieurs équipes de chercheurs français, l'objectif était d'évaluer l'efficacité d'une contre-mesure pour réduire les effets de l'impesanteur sur divers systèmes physiologiques, mais également sur **le fonctionnement cognitif**. Nous avons évalué les performances dans la tâche de prise de perspective d'autrui dans ce modèle d'immersion sèche dans lequel le flux des informations proprioceptives d'orientation spatiale est perturbé (Shenkman & Kozlovskaya, 2019). Lors de la réalisation de la tâche de prise de perspective d'autrui, des données physiologiques (mesures d'oxymétrie cérébrale (NIRS) et de suivi oculaire) ont été recueillies. Nous avons également testé des processus cognitifs non-sociaux tels que les processus d'inhibition, de mémoire de travail et également d'attention.

Dans cette étude, un groupe « contre-mesure » dont les participants portent un système de brassard de cuisse qui limite partiellement les effets perturbateurs de l'impesanteur simulée (les déplacements des fluides vers le haut du corps) est comparé à un groupe « test » immergé dans les bains sans contre-mesure. Les brassards de cuisse permettent d'atténuer le déplacement des fluides vers le haut du corps et donc les effets cardio-vasculaires de l'impesanteur (Demangel et al., 2017). L'immersion sèche agit comme un modèle d'alitement provoquant une hypokinésie notamment dans les membres inférieurs du corps, également liée à l'absence de support. Le repos musculaire avec la réduction de la force de réaction au sol et de la charge axiale ainsi que le déplacement des fluides corporels conduisent à la perte de la masse et de la force musculaire (Fovet et al., 2021; Shenkman, 2020). Ces effets produisent une désafférentation qui affectent la fonction sensorimotrice humaine et diminuent l'activité des propriocepteurs (Saveko et al., 2023).

Les résultats de l'expérience 1 ont montré une facilitation des temps de réponses dans les conditions critiques de la tâche de prise de perspective au cours des phases de 0g, suggérant que l'imagination de la perspective d'autrui implique un déplacement du cadre de référence

égocentré par rapport aux axes du corps de l'observateur et se rapporte au schéma corporel. La perte des informations sensorimotrices provoque un manque de la perception réelle de son propre corps. Ainsi, nous postulons que dans les conditions de la tâche de prise de perspective qui requièrent l'utilisation d'un cadre de référence égocentré la prise de perspective d'autrui serait facilitée dans le groupe « test » par rapport au groupe « contre-mesure » qui aurait moins de perte sensorielle au niveau des membres inférieurs du corps (**Hypothèse 1**). En effet, la perte d'informations périphériques chez des patients amputés et cérébrolésés affecte leur capacité à représenter la position et les relations des différentes parties du corps (Palermo et al., 2014a). Ainsi, les participants du groupe « test » s'appuieraient davantage sur l'avatar présent dans la scène visuelle pour former une représentation incarnée de ce dernier et se projeter dans sa position. Par ailleurs, le groupe « contre-mesure » fixerait moins l'avatar car ils s'appuieraient davantage sur leurs propres référentiels corporels pour résoudre la tâche.

Sur le plan cérébral, la jonction temporo-pariétale (TPJ) serait activée lors d'expériences hors du corps de désincarnation ou d'expériences imaginaires (Arzy et al., 2006) et une diminution de la réponse hémodynamique a été montrée au niveau du cortex pariétal supérieur droit lors d'une tâche de prise de perspective d'autrui, contrairement aux tâches impliquant des transformations mentales allocentrées au cours desquelles le taux de HbO a augmenté dans cette même région corticale (Keehner et al., 2006). Hirai et al. (2020) ont également mis en évidence une augmentation du taux de HbO dans la TPJ droite, notamment dans les régions temporales moyennes et supérieures droites et dans les régions frontales, chez les enfants âgés de moins de 11 ans dans une tâche de prise de perspective d'autrui. L'implication des zones temporales a également été observée dans d'autres études, notamment dans la prise en compte d'autrui au sein des mécanismes cérébraux de la théorie de l'esprit (Abu-Akel & Shamay-Tsoory, 2011; Martin et al., 2020). Matar Touma (2021) ont montré que le schéma corporel se construit à partir de l'âge de 9 ans ce qui peut expliquer les activations temporales et frontales dans l'étude de Hirai et al. (2020) en raison d'un effort mental nécessaire pour prendre la perspective d'une autre personne alors que la représentation mentale de son propre corps dans l'enfance n'est pas encore stable. Ainsi, dans notre étude, le taux d'hémoglobine oxygénée (HbO) serait significativement supérieur dans les régions temporales et diminueraient au contraire dans les régions pariétales lors du 5^{ème} jour d'immersion comparativement à la session de pré-immersion dans le groupe « test » mais non dans le groupe « contre-mesure ».

Par ailleurs, les résultats comportementaux de prise de perspective sociale seraient nuancés en fonction du style cognitif des participants, comme pour l'étude 1, dans le groupe « test », les participants indépendants du champ visuel auraient de meilleures performances que les

participants visuo-dépendants. Au contraire, avec l'effet des brassards de cuisse dans le groupe « contre-mesure » qui permettrait de limiter la redistribution des fluides corporels vers le haut du corps, les participants indépendants du champ visuel obtiendraient de moins bonnes performances que dans le groupe « test » (**hypothèse 2**).

La réalisation d'une tâche de prise de perspective nécessite le recours à d'autres processus cognitifs, tels que l'inhibition mais également un contrôle attentionnel soutenu et la manipulation des informations pertinentes en mémoire de travail (Bull et al., 2008; Cane et al., 2017; McKinnon & Moscovitch, 2007; Schneider et al., 2012). Dans une tâche de prise de perspective en gravité normale, l'inhibition de sa propre perspective pour pouvoir se projeter dans celle d'autrui, la manipulation de cette représentation en mémoire de travail et la mise à jour de celle-ci entre deux essais successifs représentent assurément une forte charge cognitive (Domic-Siede et al., 2021; Leech & Sharp, 2014; Martin et al., 2019; Mitchell, 2008; Schurz et al., 2014). Plus spécifiquement, les processus exécutifs seraient impliqués dans la sélection entre des perspectives incongruentes (Qureshi et al., 2010; Ramsey et al., 2013; Samson et al., 2010). En l'absence de conflit entre deux perspectives, l'engagement fronto pariétal serait réduit nécessitant moins de contrôle cognitif pour réaliser la tâche. ainsi les régions fronto pariétales seraient davantage sollicitées pour juger de la perspective de soi que de celle d'autrui (Ramsey et al., 2013). Le lobe frontal aurait une influence descendante sur la TPJ droite et exercerait un rôle de contrôle exécutif nécessaire à la gestion des conflits entre la perspective de soi et celle d'autrui (Martin et al., 2020). Le calcul de la perspective liée à l'avatar serait un processus cognitivement efficace qui ne demanderait que relativement peu de fonctions exécutives (Qureshi et al., 2010).

Ces processus cognitifs non-sociaux seront évalués dans des tâches spécifiques afin de vérifier que l'impesanteur simulée influence de manière spécifique les capacités de prise de perspective d'autrui et non d'autres processus cognitifs non-sociaux (Martin et al., 2020; Ruby & Decety, 2001). En particulier les capacités de rotation mentale allocentrées ne sont pas affectées en immersion sèche (**hypothèse 3**) car l'appui sur les repères visuels est prégnant lorsque les indices somatosensoriels sont peu ou pas disponibles dans une situation donnée (Dalecki et al., 2013; Young et al., 1986). Ainsi, comme dans l'étude de Cooper & Shepard (1973), les deux groupes « test » et « contre-mesure » auraient par conséquent des performances similaires. De manière plus générale, nous n'attendons pas de différences significatives entre les deux groupes dans les fonctions cognitives non sociales – attention, inhibition et mémoire de travail - (**hypothèse 4**) qui ne seraient pas impactées par la situation d'immersion sèche (Mekari et al., 2022). Cependant, nous supposons l'existence d'une activation plus importante dans les régions frontales et préfrontales dans le groupe contre-

mesure car ces régions seraient activées lorsqu'il s'agit de différencier sa propre perspective de celle d'autrui (Martin et al., 2020; Ramsey et al., 2013).

I. MÉTHODOLOGIE

1. Recrutement et caractéristiques des participants

L'étude en Immersion sèche a été organisée et financée par le CNES . Des binômes de participants ont passé 13 jours dans les locaux du MEDES, comprenant une phase de cinq jours de pré-immersion pour le recueil des données de base (BDC : Baseline data collection), une phase de cinq jours d'immersion sèche (DI – Dry Immersion) et une phase de trois jours de récupération (R) post-immersion (cf. **Tableau 4**). L'étude s'est déroulée pour 4 participants de Novembre à Décembre 2018 et pour 14 autres participants de Janvier à Mars 2019. La durée totale d'expérimentation est de 73 jours. Suite à la sortie du bain d'un binôme, le MEDES procède au nettoyage des bains pendant un jour puis le binôme suivant peut prendre le relai. Un recrutement initial de 20 participants a été réalisé par le MEDES. Deux participants se sont retirés de l'expérimentation avant BDC-5 pour des raisons sans rapport avec le protocole.

Tableau 4 : Déroulement du protocole en Immersion sèche pour un binôme

Recueil des données de base (BDC)					Immersion sèche (DI)					Récupération post-immersion (R)		
BDC-5	BDC-4	BDC-3	BDC-2	BDC-1	DI-1	DI-2	DI-3	DI-4	DI-5	R+0	R+1	R+2

Dix-huit participants masculins (33,4 +/- 5,6 ans) ont été répartis au hasard dans 2 groupes distincts :

- **Groupe « Test »** : Neuf participants sont immergés dans les baignoires en immersion sèche et constituent le groupe contrôle
- **Groupe « Contre-mesure »** : Neuf participants portent des brassards de cuisse lors de la phase d'immersion sèche (Kozlovskaya et al., 1995). Ces dispositifs sont portés le premier jour à partir du moment où ils sont immergés dans la baignoire, de 10h à 18h, puis de 8h à 18h durant les quatre derniers jours d'immersion.

Tous les participants ont été informés des procédures expérimentales et ont donné leur consentement écrit, libre et éclairé pour leur participation à l'étude. Le protocole expérimental a été approuvé par un comité d'éthique (**CPP Est III : 2 Octobre 2018, n° ID RCB 2018-A01470-55**).

Caractéristiques des participants et des groupes :

Tableau 5 : Données sociodémographiques des deux groupes (NR : non renseigné)

GROUPE	Réf. Sujet	Âge	Moyenne âge (ET)	Niveau d'études	Métier
« Test »	B	41	33,9 (7,1)	CAP/BEP	Pompier civil
	E	NC		Sans formation	Agriculteur
	F	25		Bac+4	Étudiant (Master sciences du climat)
	I	41		CAP/BEP	Mécanicien automobile
	K	29		Bac+3	Kinésithérapeute/Ergothérapeute
	M	43		Bac	NR
	O	30		CAP/BEP	NR
	Q	25		Sans formation	NR
	S	35		Master	NR
« Contre-mesure » (brassard de cuisses)	A	34	34,1 (3,7)	Bac+2	Informaticien
	C	29		Bac+2	Hypnothérapeute
	D	30		CAP/BEP	Pompier militaire
	G	37		Bac+2	Informaticien
	H	33		Bac+1	Pompier professionnel
	J	34		Bac+4	Pompier professionnel
	N	39		Bac+2	NR
	P	39		Sans formation	NR
	R	29		Bac	NR

Aucune différence significative n'a été montrée entre les deux groupes de participants concernant l'âge ($p > .05$) et le niveau d'études ($p > .05$).

2. Matériel

1. Mesures comportementales

1.1. Tâche expérimentale de prise de perspective

Le protocole de la tâche expérimentale de prise de perspective correspond à celui décrit pour l'étude réalisée en vol parabolique. Les seules différences concernent la présentation de la tâche sur écran LCD connecté à un ordinateur et l'utilisation d'un tunnel visuel pour exclure les indices visuels environnementaux. Nous n'avons pas équipé les participants d'un casque de réalité virtuelle car ils portaient des lunettes d'eye-tracking lors de la réalisation de la tâche de prise de perspective (cf. **Figure 47**).

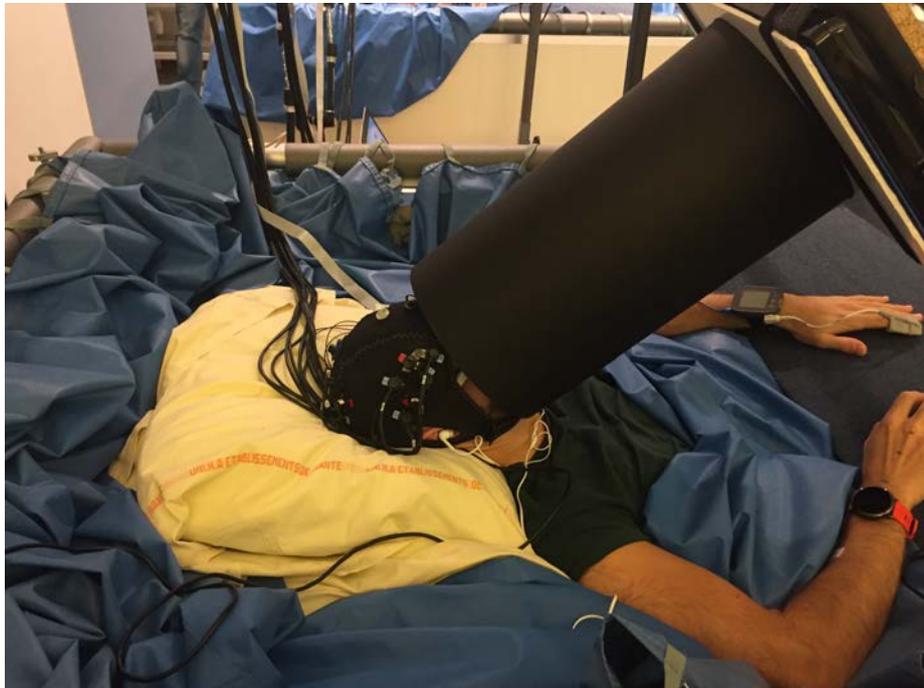


Figure 47 : Participant dans le dispositif d'immersion sèche portant le bonnet NIRS et le tunnel optique

1.2. Test de dépendance à l'égard du champ visuel : RFT

Le protocole du test de la baguette et du cadre (RFT) est identique à celui décrit dans la partie Matériels de l'expérience 1 (cf. **Test de dépendance à l'égard du champ visuel : Rod and Frame Test**).

1.3. Capacités de rotation mentale

La capacité de rotation mentale des participants a été évaluée dans une tâche utilisant des items peu complexes (version informatisée E-Prime 3.0, société « *Psychology Software Tools* »). A chaque essai, une lettre (R) ou un chiffre (2) est affiché à l'écran, soit dans son orientation habituelle (50% des essais), soit en miroir (50% des essais). Le stimulus peut être présenté sous 6 angles différents (0°, 60°, 120°, 180°, 240° et 300°). Le participant est équipé d'un clavier numérique pour répondre.

Consigne : « Vous allez voir apparaître à l'écran soit la lettre « R » soit le chiffre « 2 ». Ces items peuvent être présentés dans différentes orientations. Nous vous demandons de répondre le plus rapidement possible en appuyant sur « 1 » si l'item présenté a subi une rotation normale et sur « 2 » pour non ».

Le test comporte 2 parties. Un essai lors de la première phase (12 essais) du test se déroule ainsi :

- une croix de fixation est présentée en premier lieu (1000 ms) ;
- puis, l'item (R ou 2) apparaît de manière automatique dans une orientation verticale standard (2000 ms) ;
- ensuite, une flèche apparaît dans la même orientation que celle dans laquelle l'item cible sera présenté (1000 ms) ;
- finalement, le stimulus cible est présenté (cf. **Figure 48**).

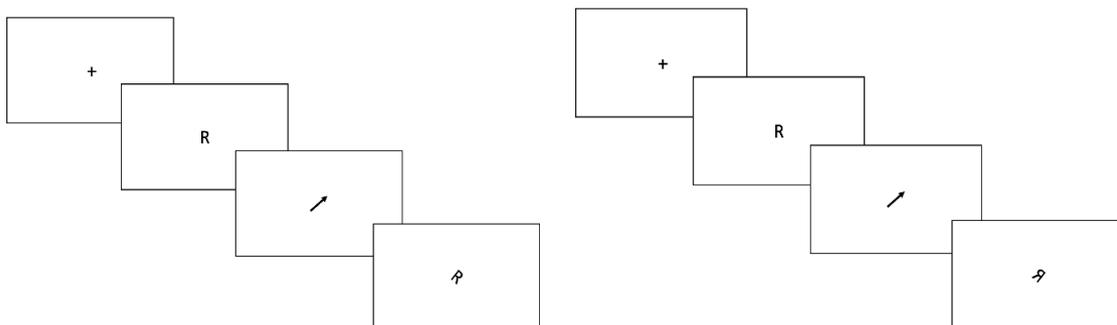


Figure 48 : Déroulement de la première phase du test de rotation mentale (à gauche l'item est présenté normalement, à droite l'item est présenté en miroir)

Le déroulement d'un essai lors de la **seconde partie (12 essais) de test** comprend uniquement la présentation d'une croix de fixation (1000 ms), suivie de la présentation du stimulus cible (cf. **Figure 49**).

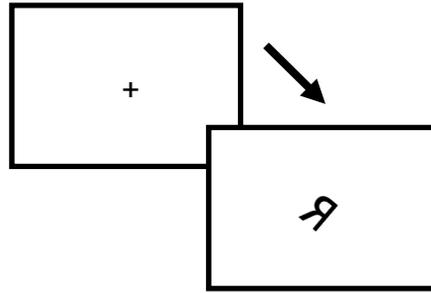


Figure 49 : Déroulement de la seconde phase de test (ici l'item cible est en miroir)

Les performances sont évaluées grâce au nombre de réponses correctes (rotations en présentation standard et rotations en miroir) avec un score maximum de 24 regroupant les deux conditions d'angles. La phase de test est précédée d'une phase de familiarisation de 4 essais (2 pour chaque phase du test) suivis d'un feedback.

1.4. Fonctions cognitives non-sociales (fonctions exécutives)

1.4.1. Temps de réaction (« Simple Reaction Time », SRT)

Ce test de temps de réaction simple, élaboré par Psychology Software Tools Inc. (<https://support.pstnet.com/hc/en-us/articles/115000383767-Simple-Reaction-Time-30133->), évalue la vigilance du participant. Le stimulus apparaît à un endroit connu du participant pour susciter une réponse connue. Seul le moment où le stimulus apparaît est incertain avec un intervalle variable (1-2 secondes) entre la réponse à un essai et la présentation du stimulus pour l'essai suivant.

L'instruction donnée au participant est la suivante : « A chaque fois que vous voyez une étoile apparaître sur l'écran, appuyez sur la touche « 1 » le plus rapidement possible » (cf. **Figure 50**).

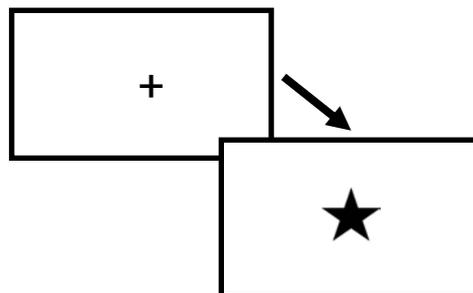


Figure 50 : Déroulement de la phase de test du temps de réaction simple

Une phase d'entraînement avec 3 essais suivis d'un feedback précède la phase de test qui comprend 60 essais sans feedback et se déroule sur une durée totale de 2 minutes environ. Nous analysons la phase de test uniquement.

1.4.2. Inhibition

Une tâche similaire au test de Stroop a été élaborée pour évaluer l'inhibition. La tâche originale de Stroop (1935) évalue la sensibilité à l'interférence générée par l'incongruence entre la couleur de l'encre et celle que le mot désigne en toutes lettres (par exemple, le mot « bleu » écrit en rouge). La capacité d'interférence reflète le fonctionnement du système exécutif et notamment l'attention sélective ainsi que la capacité à inhiber les réponses automatiques. Ici, une version informatisée issue du répertoire d'expérimentations E-Prime 3.0 (« *Psychology Software Tools* ») a été utilisée, avec une présentation item par item.

Le déroulement d'un essai est le suivant :

- présentation d'une croix de fixation (1000 ms) ;
- apparition d'un nom de couleur sur fond blanc avec propositions de 4 couleur affichés en bas de l'écran ;
- l'affichage s'effectue jusqu'à la réponse du participant puis l'écran bascule de nouveau sur la croix de fixation pour un nouvel essai.

Dans 20% des essais (condition contrôle), les mots présentés sont *congruents* avec la couleur de l'encre; par exemple, le mot « rouge » est écrit dans une encre de couleur rouge (cf. **Figure 51**).

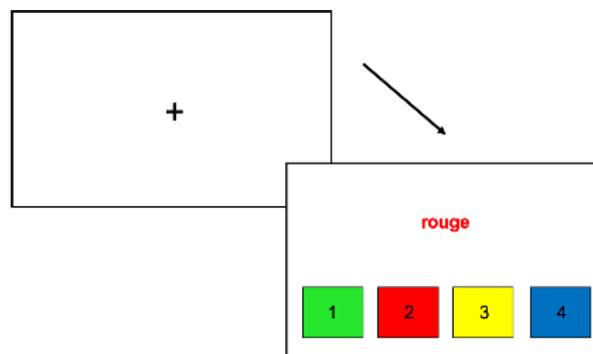


Figure 51 : Condition contrôle du test d'inhibition : croix de fixation suivie de la présentation de l'item « rouge » écrit ici en coloris rouge : condition congruente. Les touches 1, 2, 3 et 4 sont respectivement en vert, rouge, jaune et bleu.

Dans l'autre partie des essais (condition interférence), les mots présentés sont *incongruents* avec la couleur de l'encre ; par exemple, le mot « rouge » est écrit dans une encre de couleur verte (cf. **Figure 52**).

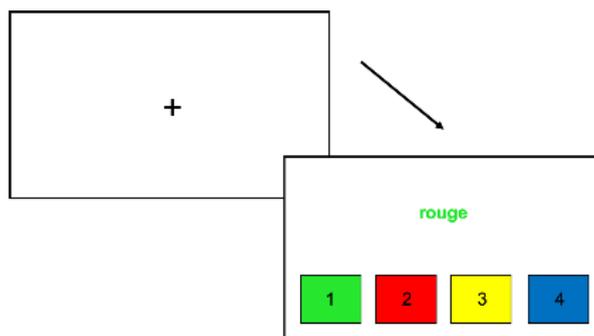


Figure 52 : Condition interférence du test d'inhibition : croix de fixation suivie de la présentation de l'item « rouge » écrit ici en coloris vert : condition incongruente

Dans les deux conditions, la tâche du participant consiste à appuyer sur la touche du pavé numérique qui correspond à la couleur de l'encre, le plus rapidement possible (cf. **Figure 53**).



Figure 53 : Clavier numérique et touches réponses verte, rouge, jaune et bleue

Durant une phase de familiarisation, le participant répond selon la consigne qui précède lors de 4 essais randomisés où les 4 couleurs différentes sont présentées. La phase de test comporte 60 essais (15x4 cycles de couleurs) randomisés avec 20% d'items « contrôle » et 80% d'items « interférence ». Nous analysons la variable « interférence » uniquement.

1.4.3. Mémoire à court terme et mémoire de travail

L'empan mnésique, notion introduite par George A. Miller (1956), désigne le nombre d'éléments que l'on peut restituer immédiatement après les avoir entendus. Ce nombre est de 7 items, plus ou moins 2 items (Miller, 1956). La tâche d'empan est classiquement utilisée en neuropsychologie afin d'évaluer les capacités de mémoire à court terme (empan endroit) et de mémoire de travail (empan envers).

Nous avons adapté le protocole proposé sur la plateforme « *Psychology Software Tools* » qui comporte deux parties :

- « *empan mnésique endroit* » : au début de l'essai, la consigne suivante apparaît à l'écran : « Nous allons vous présenter des paires de chiffres. Votre tâche va être de mémoriser

UNIQUEMENT ceux qui seront présentés en NOIR. Vous devrez ensuite les retranscrire dans l'ordre qu'ils vous ont été présentés. ».

Le participant équipé d'un clavier numérique, doit cliquer sur « Entrer » pour débiter la tâche. Des paires de chiffres vont alors s'afficher successivement au centre de l'écran (1 paire/780 secondes). Lorsque la série est terminée, le participant voit s'afficher un encadré lui demandant d'indiquer, dans l'ordre, les paires de chiffres écrits en noir vues à l'écran. Le nombre de paires de chiffres augmente progressivement de 2 à 8 paires, avec deux essais pour chaque niveau de difficulté (soit un total de 14 essais).

- « *empan mnésique envers* » : capacité de mémoire de travail. A la fin de la première partie, s'affiche de manière automatique une nouvelle consigne : « Nous allons vous présenter des paires de chiffres. Votre tâche va être de mémoriser UNIQUEMENT celles qui seront présentés en NOIR. Vous devrez ensuite les retranscrire de la dernière paire de chiffres vue à la première paire de la série. ». Le nombre de paires de chiffres augmente progressivement de 2 à 7 paires de chiffres avec une répétition à chaque niveau (soit 12 essais). La durée totale du test est d'environ 10 minutes. La variable enregistrée est le nombre de paires correctement saisies (les bons chiffres dans le bon ordre).

1.4.4. Processus attentionnels

L'attention visuelle soutenue ainsi que des capacités de concentration ont été évaluées grâce au test papier-crayon D2 (Brickenkamp et al., 2015) qui consiste à repérer et à barrer des caractères cibles parmi un grand nombre de caractères distracteurs.

Le participant doit barrer les lettres « d » accompagnées de deux traits qu'ils soient situés du même côté ou sur les côtés opposés de la lettre D (d'où le nom de « d2 ») au milieu de distracteurs constitués de la lettre D accompagnée d'un seul trait ou de la lettre P accompagnée de 1 ou de 2 traits (cf. **Figure 54**). La passation du test se fait ligne par ligne ; pour chacune des 14 lignes, le participant doit barrer le maximum de « d2 » en 20 secondes. L'expérimentateur indique, après chaque intervalle de 20 secondes de passer à la ligne suivante. Le test dure 4 minutes 40 sec.

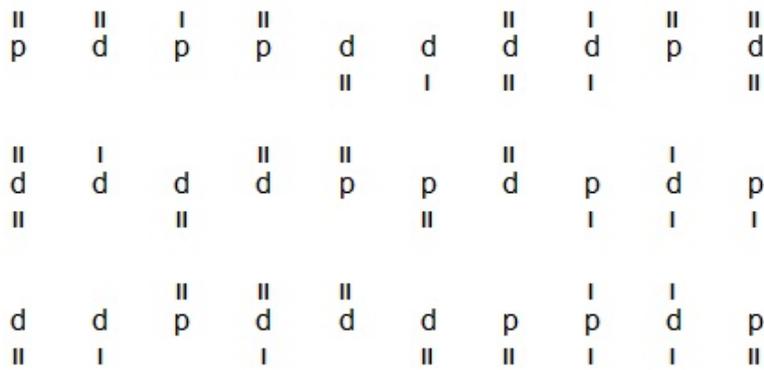


Figure 54 : Exemple D2 : l'objectif de ce test est d'entourer les d entourés de deux traits.

Deux indices sont exploités dans ce travail : **l'indice de performance qualitatif (F%)** et **l'indice de performance de concentration (KL)**. Le pourcentage d'erreurs (F%) objective la qualité de la performance, la précision et le soin apporté à la réalisation du test. Le pourcentage d'erreurs est calculé avec le nombre d'omissions (cibles oubliées) et le nombre d'ajouts (distracteurs entourés). L'indice de concentration **KL** est correspond au nombre d'items correctement traités.

1.5. Questionnaire de douleur de Saint Antoine

A la fin de chaque session, les participants ont complété **le questionnaire de douleur de Saint Antoine (QDSA)** (cf. Annexe 8) qui permet de décrire l'expérience douloureuse ressentie au cours de l'immersion sèche notamment due à la position couchée sans support et le manque de mobilité.

Il comporte 61 qualificatifs répartis en 16 indices :

- **Neuf indices sensoriels (de A à I)** : par exemple, pincement, écrasement, compression, torsion, brûlures, etc. qui distinguent la composante neuropathique de la douleur ;
- **Sept indices affectifs (J à P)** : par exemple, inquiétant, angoissant, gênant, énervant, fatiguant, etc. qui considèrent le retentissement psychologique d'une situation donnée.

La consigne est : Donnez au qualificatif que vous avez choisi une note de 0 à 4.

Cotation : 0 = absent/pas du tout ; 1 = faible/un peu ; 2 = modéré/moyennement ; 3 = fort/beaucoup ; 4 = extrêmement fort/extrêmement

2. Mesures physiologiques

2.1. Mesure d'oxymétrie cérébrale (NIRS)

La NIRS (Near InfraRed Spectroscopy) est une technique d'imagerie non invasive basée sur la spectroscopie proche infrarouge. Cette technologie utilise un faisceau de lumière dans le proche infrarouge qui passe à travers les tissus organiques et qui mesure l'absorption et la dispersion des photons. L'utilisation de cet outil permet de mesurer l'activité métabolique, ou « perfusion cérébrale ». L'absorption des ondes lumineuses du proche infrarouge (absorption optique) par l'oxyhémoglobine (hémoglobine oxygénée, HbO) et la désoxyhémoglobine (hémoglobine désoxygénée, HbR ou HHb) sert de base de calcul de la saturation sanguine en O₂. Cette concentration est mesurée grâce à la loi de Beer-Lambert, afin de tenir compte de la diffusion et de l'absorbance spécifique des tissus traversés. Cette technique permet de recueillir la valeur d'oxygénation tissulaire régionale (HbO + HHb = HbT) (cf. **Figure 55**).

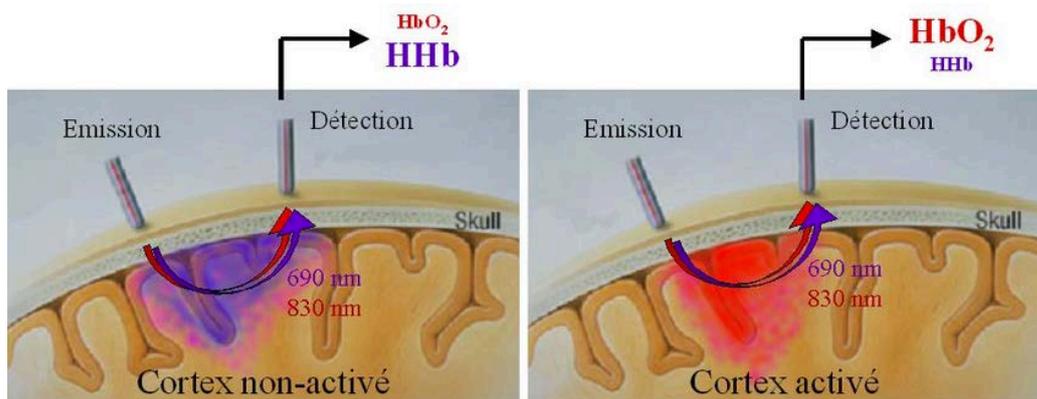


Figure 55 : Illustration du fonctionnement de la NIRS à l'aide de deux optodes, une émettrice (émission) et une réceptrice (détection). Lorsque la zone corticale n'est pas activée, la mesure de désoxyhémoglobine HHb est plus importante que celle de l'oxyhémoglobine HbO ; au contraire lorsque la zone corticale est activée, l'oxyhémoglobine HbO est plus élevée que la désoxyhémoglobine HHb.

La NIRS est un dispositif portable, silencieux, avec une mise en place rapide et une possibilité d'hyperscanning (enregistrement de deux participants avec les bonnets NIRS reliés sur une seule machine en même temps). Cependant, une des limitations principales de ce dispositif est de ne pas pouvoir mesurer les réponses hémodynamiques dans les structures cérébrales profondes (supérieur à 4 cm) .

Le principe technique de la NIRS consiste à positionner deux capteurs à faisceaux lumineux (une source et un ou plusieurs détecteurs) à 3 cm d'intervalle au minimum afin d'obtenir

l'oxygénation d'une zone cérébrale cible et éviter les réponses superficielles d'une surface non liée à la stimulation cérébrale (crâne, peau, os) qui relève du systémique.



Figure 56 : A gauche, le bonnet NIRS est disposé sur un sujet test. A droite, l'équipement NIRS utilisé permettant de recueillir les données en hyperscanning.

Montage réalisé pour l'expérience

Le dispositif nous a été mis à disposition par l'ISAE SUPAERO (Toulouse) ainsi qu'une partie des bonnets par la plateforme technologique Cognition, Comportements et Usages (CCU) de l'Université Toulouse Jean Jaurès.

Nous avons positionné les optodes sur le bonnet NIRS selon le système international 10-20 avec un réseau de 20 optodes (8 émetteurs de lumière « sources » et 12 émetteurs de lumière « détecteurs ») couvrant les zones préfrontales, frontales, temporales et pariétales de façon équivalente sur les deux hémisphères cérébraux (cf. **Figure 57**). La distance source-récepteur était de 2 à 3 cm pour les optodes adjacentes et les longueurs d'onde utilisées étaient de 730 et 850 nm. La fréquence d'échantillonnage était de 7,8125 Hz. Ce montage a été ensuite spécifié dans le logiciel NIRStar 14.2 (NIRx Medical Technologies, LLC. Los Angeles, Californie) avant de réaliser les acquisitions.

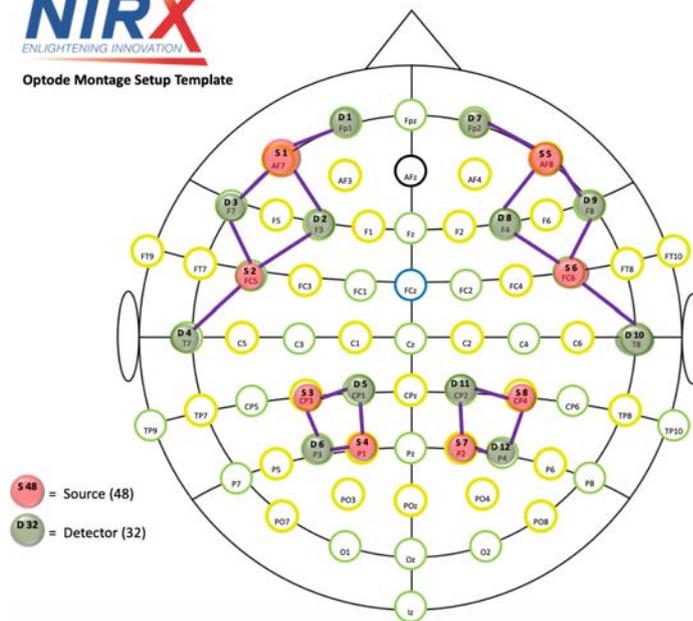


Figure 57 : Représentation du positionnement des optodes sources en rouge et détecteurs en vert au cours de l'étude d'immersion sèche.

Recueil et traitement des données :

Les mesures fNIRS ont été effectuées à l'aide du système NIRScout (NIRx Medical Technologies, LLC. Los Angeles, Californie), acquises via le logiciel NIRStar 14.2 et traitées dans le logiciel Homer2 (environnement Matlab), développé par l'Institut National de la Santé. Les artefacts parasites (os, peau, cardiaques et respiratoires (ondes de Meyer)) ont été filtrés grâce à Homer 2, dont les paramètres de base ont été conservés, sauf pour certains paramètres spécifiés dans la littérature (Dans et al., 2021; Hocke et al., 2018; Klein & Kranczioch, 2019). Nous avons ajusté le « Hpf » (High-Pass filter) à 0.010Hz, ce qui permet de réduire la dérive du signal et les variations parasites lentes. Le « Lpf » (Low-Pass filter) a été spécifié à 0.5 Hz, ce qui permet en principe de retirer l'activité respiratoire et les types d'artefacts ayant la forme de « pics ». Ainsi que le « Dpf » (« differential path length »), c'est-à-dire le rapport entre la longueur moyenne du trajet optique parcouru par la lumière dans le tissu par rapport à la distance entre la source et le détecteur, ajusté à 6 (valeur standard) couramment utilisé pour supprimer les informations de fréquence élevée ($\geq 0,2$ Hz ; rythme cardiaque, fréquence respiratoire, bruit d'instrument) et de fréquence très basse ($< 0,01$ Hz) du signal.

Les données aberrantes (« outliers »), c'est-à-dire les données excédant un coefficient de variation de 15% ont été retirées (Pinti et al., 2018; Piper et al., 2014). Des moyennes de l'oxyhémoglobine (HbO) ont été effectuées pour chaque passation avec la méthode classique de « moyennage » (« averaging method ») (Ayaz et al., 2012; Minako Uga et al., 2014).

2.2. Oculométrie

Les mouvements oculaires des participants au cours de la tâche de prise de perspective ont été captés grâce à des lunettes Senso-Motoric Instruments SMI 2.0 et enregistrés sur smartphone (cf. **Figure 58**) ; équipements mis à disposition par la plateforme technologique Cognition, Comportements et Usages (CCU) de l'Université Toulouse Jean Jaurès.



Figure 58 : Participant lors du protocole d'immersion sèche équipé du dispositif d'eye-tracking et le bonnet NIRS

Le logiciel BeGaze (Behavioral and Gaze Analysis), développé par Gaze Intelligence, utilisé pour l'analyse des données de suivi monoculaire et binoculaire fournit des informations sur le balayage du regard, les zones d'intérêt statiques et dynamiques (*AOI : Areas of Interest*), et les saccades oculaires et permet l'export de plusieurs paramètres (durée de fixation du regard, nombre de regards, taille de la pupille, fréquence de clignements oculaires).

Plusieurs aires d'intérêts (*AOI*) ont été définies dans la scène visuelle projetée à chaque essai de la tâche de prise de perspective (cf. **Figure 59**) :

- objet correct ;
- emplacement correct ;
- objet incorrect ;
- emplacement incorrect ;
- objet erroné ;
- compartiment erroné ;
- avatar ;
- autre.

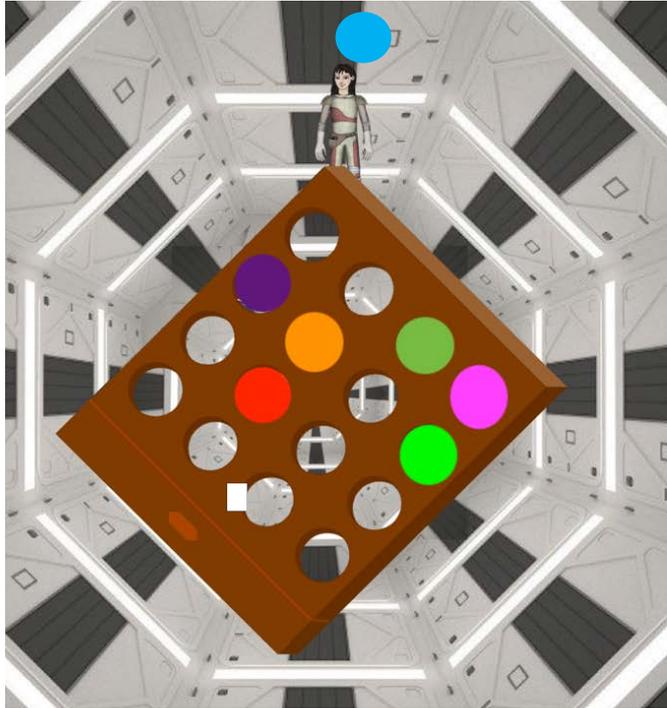


Figure 59 : Positionnement des AOIs dans la condition « inclinaison étagère » de la tâche de prise de perspective

72 conditions par session d'expérimentation (12 blocs de 6 essais) ont été codées à l'image de la **Figure 59** en tenant compte de la consigne énoncée au participant, de la réponse correcte et des erreurs de perspective.

Nous avons analysé :

- le nombre de fixations (« *Visual Intake Count* ») ;
- le temps passé par AOI : durée de fixation cumulée (« *Dwell time* »).

Une perte importante des données a été occasionnée au cours des sessions d'immersion par des défauts de calibration de l'appareil, d'instabilité des lunettes et les mouvements des participants dans le bain, c'est pourquoi les analyses statistiques ont été réalisées sur 12 sujets (six participants dans le groupe « test » et six participants dans le groupe « contre-mesure »).

3. Procédure

Les tâches réalisées au cours de l'immersion sèche ont été créées sur support informatique pour la plupart afin de mettre en lien les mesures comportementales avec les mesures physiologiques. Les sessions se déroulent sur cinq jours à 48h d'intervalle de BDC-2 à R+1 (**Tableau 6**). Pour chacune des sessions, les participants se trouvent dans une position allongée comme durant toute la durée de l'immersion.

Tableau 6 : Jours d'expérimentations au cours du protocole d'immersion sèche

Baseline Data Collection (BDC)					Dry Immersion (DI)					Recovery (R)		
BDC-5	BDC-4	BDC-3	BDC-2	BDC-1	DI-1	DI-2	DI-3	DI-4	DI-5	R+0	R+1	R+2
			X		X		X		X		X	

Les expérimentations ont été programmées et gérées sur un ordinateur Dell Alienware Cassini 15 et projetées sur un écran Philips 190 cm Brilliance (LCD format 16/9 19 pouces 1440 x 900 pixels), installé au-dessus des baignoires via un système de barre portatrices de l'écran, et incliné pour qu'il se trouve parallèle du champ visuel du participant.

L'ordre de passation des tests varie d'une session à l'autre pour contrebalancer les effets d'apprentissage, tout en étant contraint par l'installation, coûteuse en temps, du tunnel visuel pour réaliser la tâche de prise de perspective. L'ordre de deux tests a été alterné :

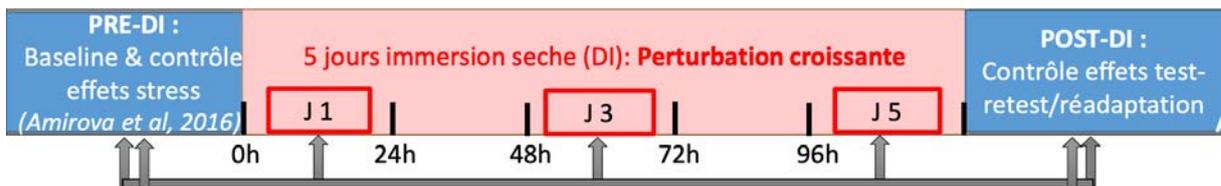
Tableau 7 : Ordre de passation des tests alternés entre chaque session lors du protocole en immersion sèche

1	Temps de réaction simple	2 min	16 MIN
2	Test de mémoire de travail (Brown)	6 min	
3	Test de rotation mentale (Cooper & Shepard)	2 min	
4	Test de contrôle de l'inhibition	6 min	
PAUSE			
5	Tâche de prise de perspective	10 mn	23 MIN
6	RFT	3 min	

1	Tâche de prise de perspective	10 min	13 MIN
2	RFT	3 min	
PAUSE			
1	Temps de réaction simple	2 min	

2	Test de mémoire de travail (Brown)	6 min	16 MIN
3	Test de rotation mentale (Cooper & Shepard)	2 min	
4	Test de contrôle de l'inhibition	6 min	

Les sessions de test sont programmées le matin après 9h30, lorsque les participants ont pris le petit-déjeuner, la douche et que d'éventuelles mesures physiologiques ont été réalisées par d'autres équipes. La durée totale des tests est de 60 minutes, mais une session de test est prévue pour durer environ 75 à 90 minutes afin d'allouer du temps aux instructions de la tâche, aux essais de familiarisation et afin d'inclure des pauses entre les tests.



4. Hypothèses opérationnelles

Le modèle expérimental d'impesanteur simulée en immersion sèche induit une perturbation des informations proprioceptives par l'absence de support dans le bain. Ces modifications physiologiques recréant partiellement les effets de l'impesanteur se produisent dès les premières heures qui suivent l'immersion du sujet dans le bain avec un pic d'effets après 3 jours d'immersion (Kozlovskaja, 2008; Navasiolava et al., 2011). De plus, Lazarev et al. (2018) ont montré que les ondes alpha étaient plus puissantes au 5^{ème} jour d'immersion, dû à la réduction du flux sensoriel vers le cortex cérébral. De ce fait, même si les données ont été recueillies au 1^{er}, 3^{ème} et 5^{ème} jour d'immersion, les hypothèses ciblent les modifications cognitives et physiologiques observées le 5^{ème} jour d'immersion par rapport aux données enregistrées lors de la ligne de base, avant l'immersion des participants dans les bains.

Dans ces hypothèses, nous distinguerons deux groupes : le groupe « test » qui subit les effets de l'immersion et le groupe « contre-mesure » qui porte le brassard de cuisse permettant de contrebalancer les effets du déplacement des fluides corporels vers le haut du corps et de réduire ainsi les effets de l'impesanteur simulée par l'immersion sèche.

- **Hypothèse 1 : la contre-mesure réduit les effets de l'immersion sur les mesures comportementales et physiologiques**

Ces trois hypothèses reposent sur les mesures comportementales liées à la tâche de prise de perspective et les mesures physiologiques qui ont été recueillies lors de cette tâche : l'oxymétrie cérébrale ainsi que l'oculométrie.

Hypothèse 1.1. : En effet, similairement à l'expérimentation en vol parabolique, nous postulons que le groupe test a des performances (temps de réponse et taux de réponses correctes) plus élevées lors du 5^{ème} jour d'immersion par rapport au groupe contre-mesure dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » de la tâche de prise de perspective.

Hypothèse 1.2. : D'autre part, le taux d'hémoglobine oxygénée (HbO) est significativement supérieur dans les régions temporales et diminue dans les régions pariétales lors du 5^{ème} jour d'immersion comparativement à la session de pré-immersion dans le groupe « test » mais non dans le groupe « contre-mesure ».

Hypothèse 1.3. : Le nombre de fixations oculaires et le temps cumulé de fixations oculaires sur l'avatar recueillis avec le dispositif d'oculométrie est plus élevé dans le groupe « test » que dans le groupe « contre-mesure » au 5^{ème} jour d'immersion.

- **Hypothèse 2 : Les participants visuo-indépendants ont des performances meilleures dans les conditions de prise de perspective égocentré**

Dans le groupe « test », les performances à la tâche de prise de perspective sont supérieures dans les conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » de la tâche de prise de perspective pour les participants visuo-indépendants que pour les participants visuo-dépendants.

- **Hypothèse 3 : les capacités de rotation mentale allocentrées ne sont pas affectées en immersion sèche**

En présence d'un indice indiquant l'orientation d'une cible familière (lettre/chiffre), les TR sont courts indépendamment de l'angle de rotation en raison de la préparation mentale en lien avec l'indice présenté au préalable alors qu'en l'absence d'indice préalable, les TR augmentent avec l'augmentation de l'angle de rotation mentale jusqu'à 180° ; qu'elles soient réalisées dans le sens horaire ou antihoraire.

Hypothèse 3.1. : Pour les conditions de rotation mentale « avec flèche » et « sans flèche » indiquant l'orientation de la cible, nous postulons que les temps de réponses (TR) ne varient pas significativement entre les sessions de pré-immersion et le 5^{ème} jour d'immersion, et cela indépendamment de l'angle de rotation du stimulus.

Hypothèse 3.2. : Néanmoins, dans la condition sans flèche, les TR sont plus élevés dans le groupe d'angles « inférieurs à l'horizon » que dans le groupe d'angle « supérieurs à l'horizon », dans les deux groupes, comme dans l'étude de Cooper & Shepard (1973). Ainsi, les capacités de transformations mentales allocentrées seraient préservées et identiques pour les deux groupes.

- **Hypothèse 4 : Les processus cognitifs non-sociaux ne sont pas impactés par l'immersion : les deux groupes ont des performances similaires dans les tâches exécutives.**

L'évaluation des processus cognitifs non-sociaux permet d'observer si l'immersion sèche a un effet direct sur ces processus impliqués lors d'une prise de perspective d'autrui et impactant ces aptitudes ou si la prise de perspective d'autrui en elle-même est impactée par l'immersion. Nous postulons que les processus exécutifs de temps de réaction, d'inhibition, de mémoire de travail et d'attention ne sont pas impactés par l'immersion sèche et les performances ne sont pas différentes entre les deux groupes. Cependant, sur le plan physiologique, dans le groupe « contre-mesure », nous posons l'hypothèse que le taux de HbO est plus élevé dans les régions frontales et préfrontales que dans le groupe « test » au cours de la tâche de prise de perspective car ces régions seraient activées lorsqu'il s'agit de différencier sa propre perspective de celle d'autrui (Martin et al., 2020; Ramsey et al., 2013).

5. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées sur 18 participants. Un participant a été retiré des données car il s'est retiré du protocole au cours de l'expérimentation et nous avons choisi de retirer un autre participant en raison d'un manque manifeste de motivation pour réaliser les tâches proposées. Nous préciserons pour chaque tâche, le nombre de participants et les sessions retirées des analyses (problèmes informatiques, calibration d'oculométrie, etc.) Nous avons utilisé des tests non-paramétriques, comme dans l'étude 1 à savoir le test de Friedman (comparaison d'échantillons appariés) suivi d'analyses post-hoc de Durbin-Conover (comparaisons multiples par paires).

Le test de rang signé de Wilcoxon a permis de comparer deux moyennes d'échantillons appariés (comparaisons entre les deux groupes). Tous les tests étaient unilatéraux (significativité aux résultats aux tests pour la même valeur seuil de $p < .05$). Concernant la tâche de prise de perspective, les données supérieures à 3 écart-types de la moyenne pour les TR pour chaque condition ont été retirées des analyses.

II. Résultats

1. Impact de l'immersion sèche sur les capacités de prise de perspective d'autrui

1.1. Mesure de ligne de base en pré-immersion

Le protocole de la tâche de prise de perspective avait été validé lors de l'étude réalisée en vol parabolique. Néanmoins, les données recueillies en pré-immersion (BDC-2) permettent de (1) vérifier que les résultats sont similaires à ceux obtenus dans la même tâche en pré-vol dans l'expérience 1 et de (2) constituer une ligne de base pour évaluer l'effet de la contre-mesure sur la prise de perspective. En pré-immersion, aucune différence significative n'a été montrée entre les deux groupes « test » et « contre-mesure » dans aucune des conditions de la tâche ($p > .05$ pour toutes les comparaisons deux à deux). C'est pourquoi les données des deux groupes de participants ont été cumulées pour réaliser des analyses globales des performances obtenues dans les différentes conditions de la tâche en pré-immersion.

Les temps de réponses (TR) varient significativement entre les cinq conditions (contrôles et critiques) au test de Friedman ($\chi^2(4) = 29,7$; $p < .001$). Les analyses post-hoc montrent des temps de réponses significativement plus longs dans les conditions « prise de perspective standard » ($p = 0.01$) ; « inclinaison étagère » ($p = 0.004$) ; « inclinaison avatar » ($p < .001$) ; « inclinaison congruente » ($p = 0.002$) comparativement à la condition contrôle « perception directe ». Cependant, par rapport à la condition contrôle « prise de perspective standard », les temps de réponses sont significativement supérieurs seulement dans une condition critique, « inclinaison congruente » ($p = 0.007$), mais non pas dans les autres conditions critiques (« inclinaison étagère » ($p = 0.266$) ; « inclinaison avatar » ($p = 0.073$) ; cf. **Figure 60**), contrairement à ce qui a été observé en pré-vol dans l'étude 1.

Les taux de réponses correctes varient également entre les cinq conditions de la tâche de prise de perspective ($\chi^2(4) = 11.4$; $p = 0.023$). Les analyses post-hoc de comparaison par paires montrent que les taux de réponses correctes sont significativement inférieurs dans les conditions critiques (« inclinaison étagère » ($p = 0.004$) ; « inclinaison avatar » ($p < .001$) ; « inclinaison congruente » ($p = 0.002$)) que ceux dans la condition contrôle « perception directe ». De plus, les taux de réponses correctes sont significativement plus faibles dans la condition « inclinaison avatar » que dans la condition contrôle « prise de perspective standard » ($p = 0.038$) (cf. **Figure 61**).

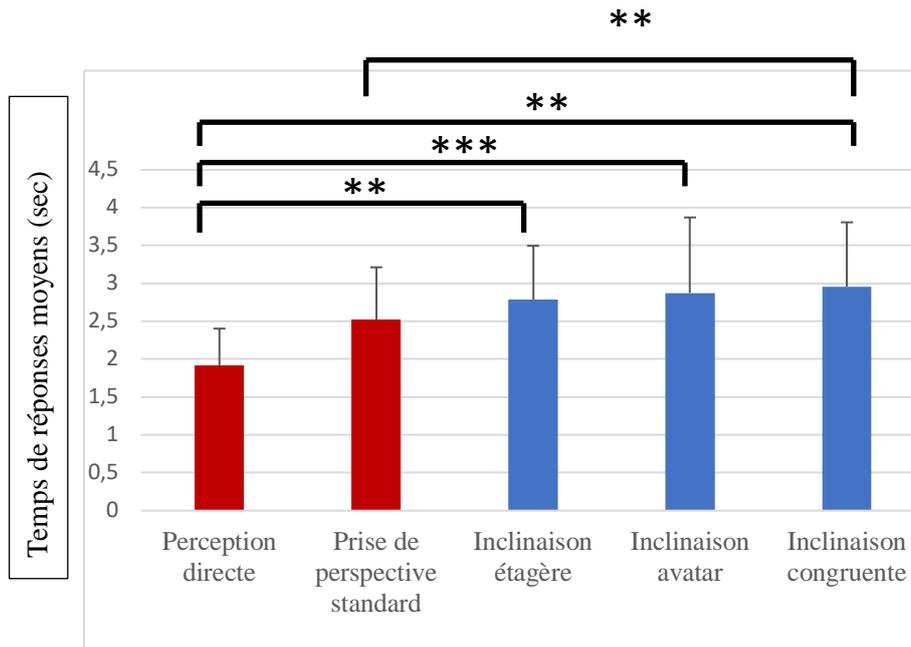


Figure 60 : Temps de réponses moyens et ET (secondes) dans les conditions contrôles (en rouge) et critiques (en bleu) de la tâche de prise de perspective en pré-immersion (BDC-2) ($p < .01^{**}$; $p < .001^{***}$).

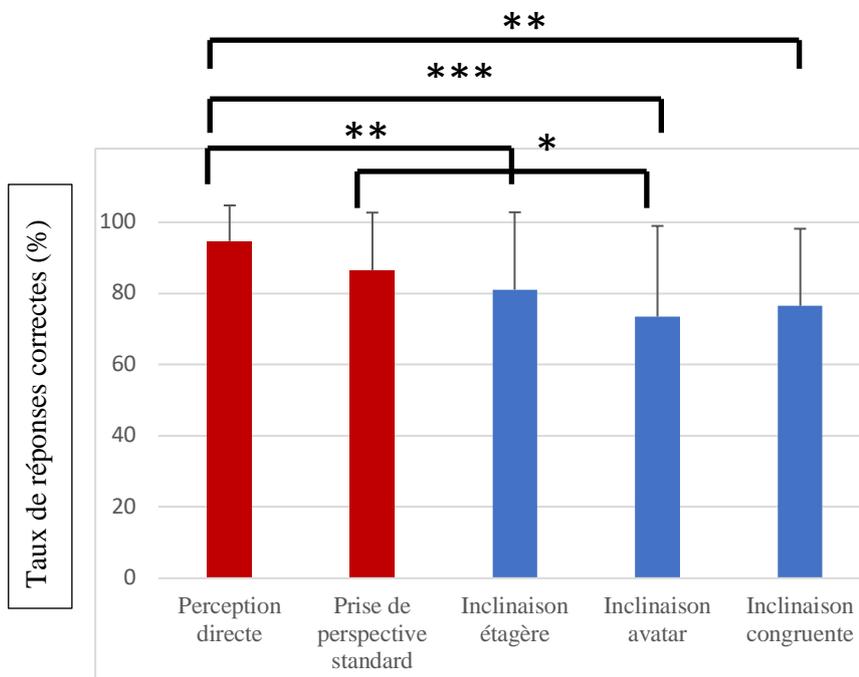


Figure 61 : Taux de réponses correctes et ET (%) dans chaque condition contrôle (bâtonnets rouges) et critique (bâtonnets bleus) de la tâche de prise de perspective en pré-immersion (BDC-2) ($p < .05^{*}$; $p < .01^{**}$; $p < .001^{***}$).

1.2. Analyse de l'effet de la contre-mesure

Dans un premier temps, les performances sont analysées par groupe pour tester l'hypothèse d'un effet de répétition avant de comparer les performances des deux groupes. Dans le groupe « test », les TR dans la tâche de prise de perspective diminuent significativement entre la séance de pré-immersion et le 5^{ème} jour en immersion (DI-5) dans la condition contrôle « prise de perspective standard » ($p = 0.034$). Aucune différence significative entre la session de pré-immersion et DI-5 n'a été montrée pour les autres conditions de la tâche de prise de perspective dans ce groupe ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 62**).

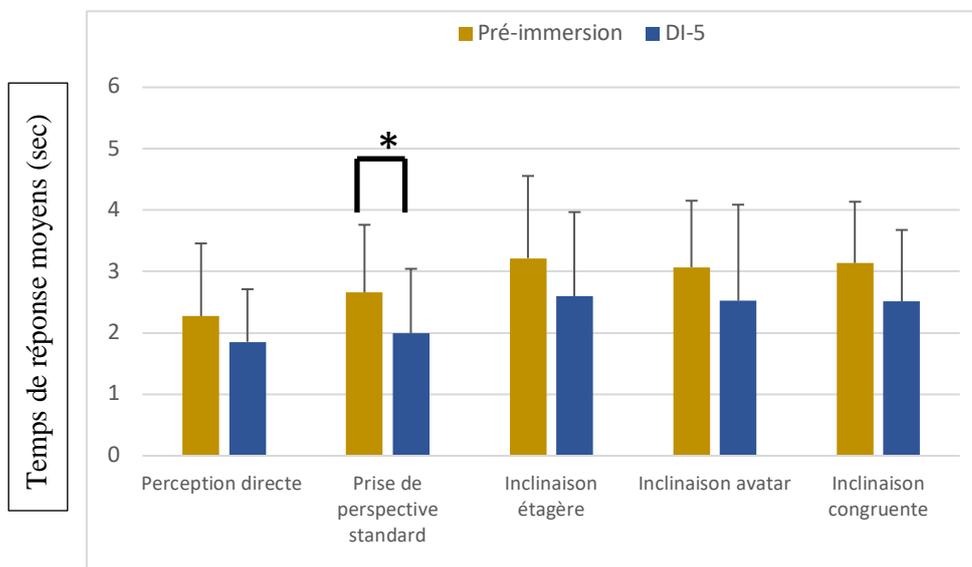


Figure 62 : Temps de réponse moyens et ET (sec) entre Pré-immersion (bâtonnets en jaune) et DI-5 (bâtonnets en bleu) pour le groupe « test » (résultat au test de Wilcoxon, $p < .05^*$).

Les taux de réponses correctes ne diffèrent pas significativement pour aucune des 5 conditions de la tâche de prise de perspective entre les sessions de pré-immersion et DI-5 pour le groupe « test » ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 63**).

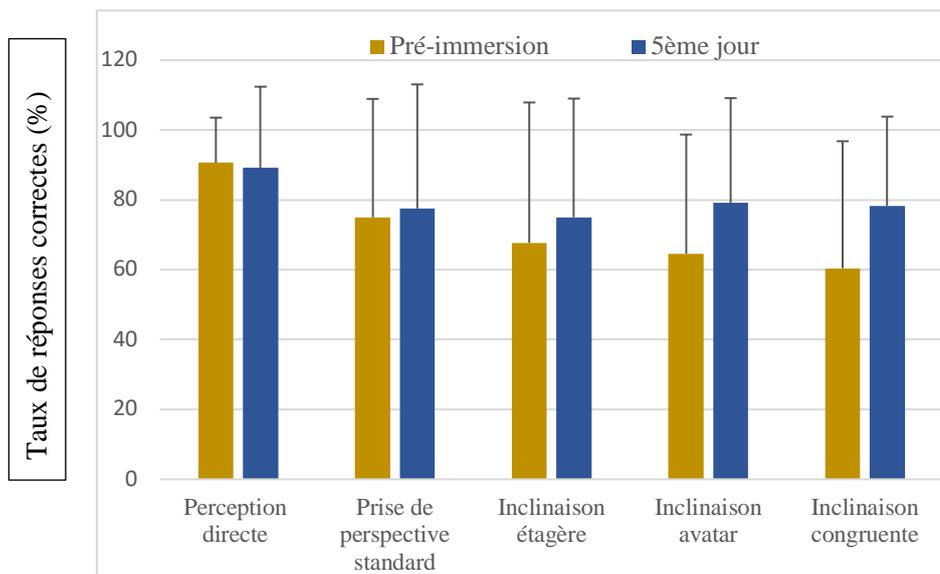


Figure 63 : Taux de réponses correctes et ET (%) pour chaque condition de la tâche de prise de perspective entre la session de pré-immersion (bâtonnets jaune) et DI-5 (5^{ème} jour d'immersion) (bâtonnets bleu).

Pour le groupe « contre-mesure », les comparaisons par paires montrent également des temps de réponses significativement plus courts dans la condition « prise de perspective standard » en DI-5 qu'en pré-immersion ($p = 0.017$). Les temps de réponses ne diffèrent pas significativement pour les autres conditions entre les deux sessions ($p > .05$ pour les autres comparaisons) (cf. **Figure 64**).

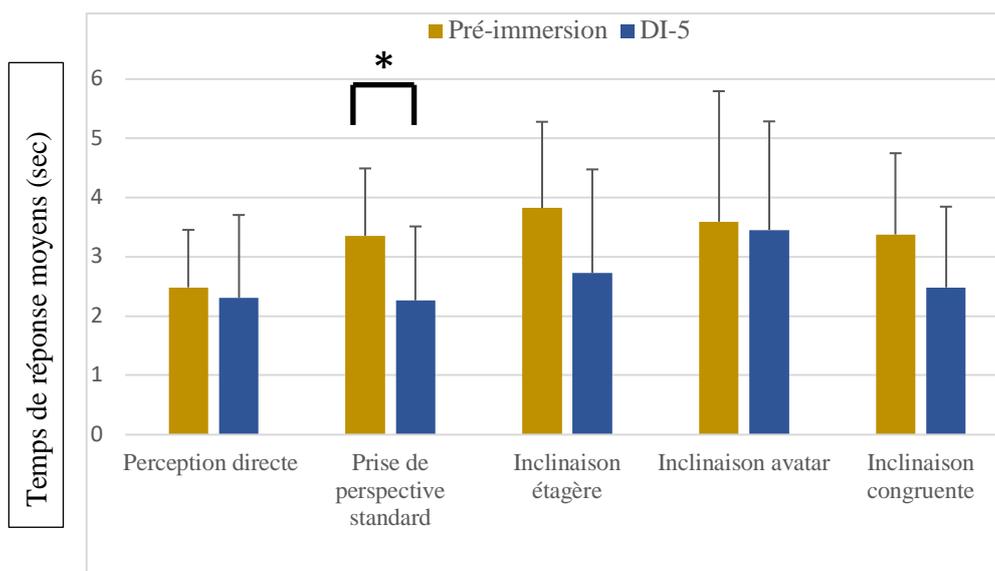


Figure 64 : Temps de réponses moyens et ET (sec) entre les sessions de pré-immersion (bâtonnets jaune) et DI-5 (5^{ème} jour d'immersion) (bâtonnets bleu) pour le groupe « contre-mesure » (résultat au test de Wilcoxon, $p < .05^*$).

Par ailleurs, pour le groupe contre-mesure, aucune différence significative entre les taux de réponses correctes n'a été montrée dans aucune condition de la tâche de prise de perspective entre les sessions de pré-immersion et le 5^{ème} jour d'immersion ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 65**).

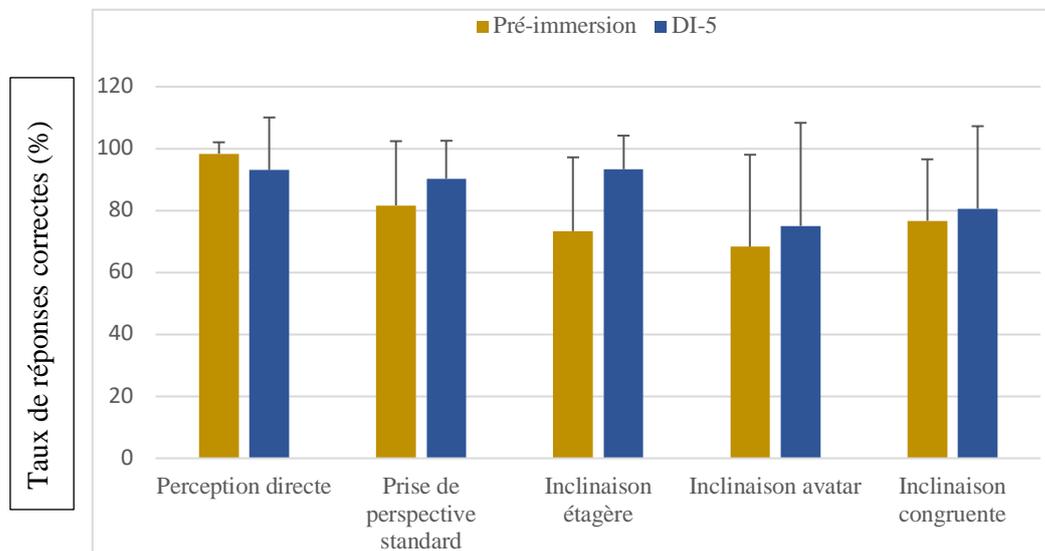


Figure 65 : Taux de réponses correctes et ET (%) pour chaque condition de la tâche de prise de perspective entre la session de pré-immersion (bâtonnets jaune) et DI-5 (5^{ème} jour d'immersion) (bâtonnets bleu) pour le groupe « contre-mesure »

La comparaison des performances des deux groupes le 5^{ème} jour d'immersion révèle des temps de réponses significativement plus rapides dans la condition « inclinaison avatar » pour le groupe « test » que pour le groupe « contre-mesure » ($p = 0.05$) (cf. **Figure 66**).

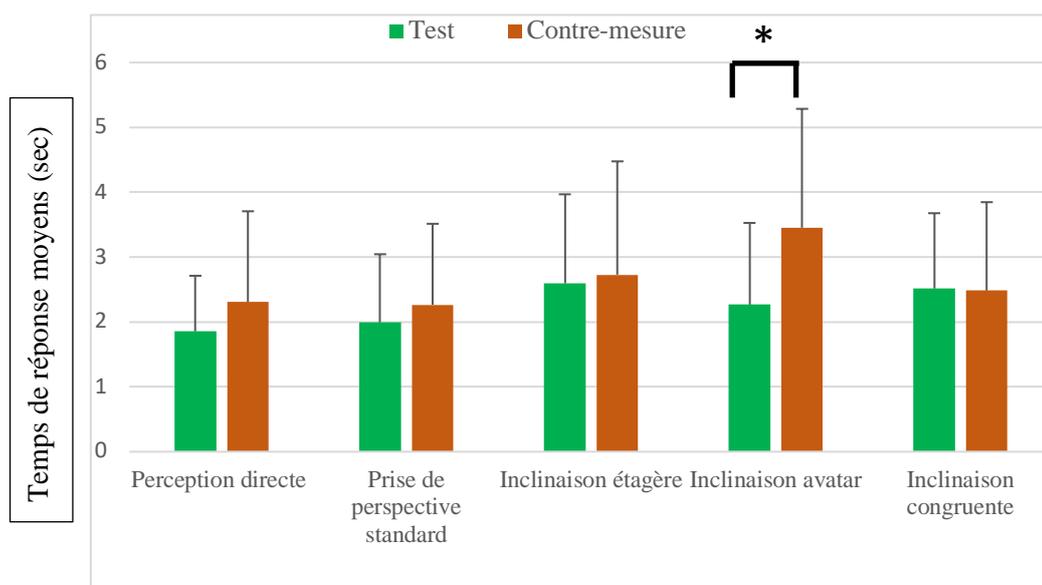


Figure 66 : Temps de réponses moyens et ET (sec) dans les groupe « test » (bâtonnets verts) et « contre-mesure » (bâtonnets marrons) lors du 5^{ème} jour d'immersion dans chaque condition de la tâche de prise de perspective (résultat au test de Wilcoxon, $p = 0.05^*$).

En revanche, aucune différence significative n'a été montrée pour les taux de réponses correctes entre les deux groupes lors du 5^{ème} jour d'immersion ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 67**).

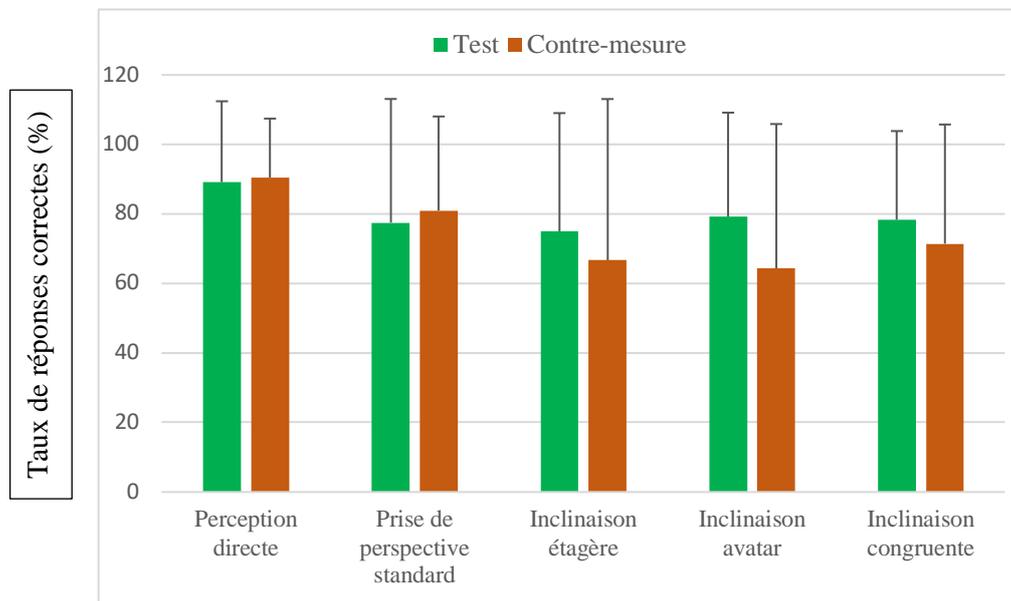


Figure 67 : Taux de réponses correctes et ET (%) dans chaque condition de la tâche de prise de perspective pour chacun des groupes « test » (bâtonnets verts) et « contre-mesure » (bâtonnets marrons) au cours du 5^{ème} jour d'immersion.

1.2.1. Effet de l'immersion sèche sur l'oxygénation des régions corticales d'intérêt

Nous avons posé l'hypothèse que le taux d'hémoglobine oxygénée (Hb0) est significativement supérieur dans les régions temporales et diminue dans les régions pariétales lors du 5^{ème} jour d'immersion comparativement à la session de pré-immersion dans le groupe « test » mais non dans le groupe « contre-mesure ».

Nous avons observé la concentration en Hb0 dans chaque région corticale d'intérêt, dans cette partie : les régions temporales et pariétales, en distinguant la latéralisation hémisphérique.

Dans la région temporale, aucun effet principal entre les deux groupes « test » et « contre-mesure » sur la concentration en Hb0 n'a été montré en temporal gauche ($\chi^2(1) = 0.421$; $p = 0.516$), ni en temporal droit ($\chi^2(1) = 0.441$; $p = 0.556$).

Cependant, les comparaisons par paires (Wilcoxon) ont montré dans **la région temporale gauche** des taux de Hb0 significativement plus élevés lors du 5^{ème} jour d'immersion dans le groupe « test » que dans le groupe « contre-mesure » ($p = 0.05$) (cf. **Figure 68**). Aucune variation significative des taux de Hb0 n'a été montrée en pariétal droit entre les deux groupes ($p > .05$ pour toutes les comparaisons).

Il n'existe pas non plus d'effet global spécifique lié à l'immersion dans le groupe « test » latéralisé à gauche ($\chi^2 (4) = 2.00$; $p = 0.736$), ni à droite ($\chi^2 (4) = 2.27$; $p = 0.687$) lors des différentes sessions d'expérimentations (de pré-immersion à post-immersion).

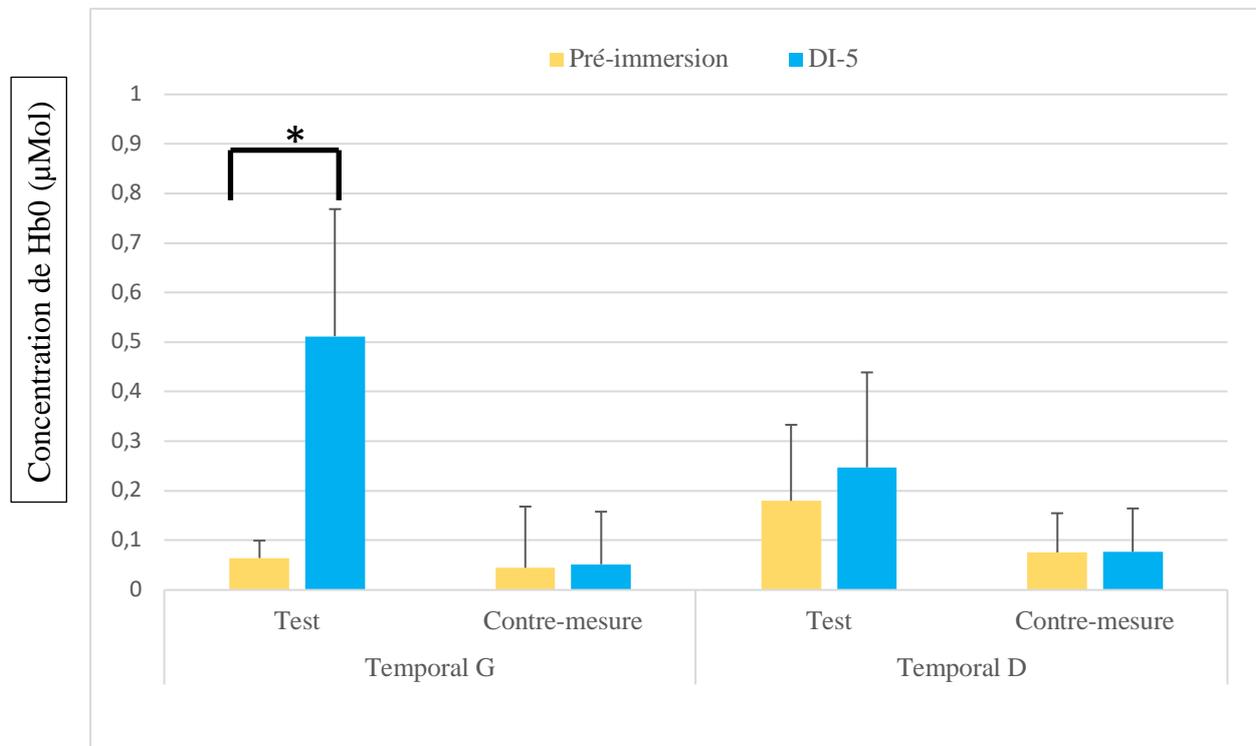


Figure 68 : Concentration de Hb0 (erreur type) (µMol) dans les régions temporales gauche et droite au cours de la tâche de prise de perspective lors des sessions de pré-immersion (bâtonnets jaunes) et au 5^{ème} jour d'immersion (bâtonnets bleus) dans les deux groupes (résultat au test de Wilcoxon, $p = 0.05^*$).

De même, dans la région pariétale, aucun effet principal entre les deux groupes « test » et « contre-mesure » sur la concentration en Hb0 n'a été montré en pariétal gauche ($\chi^2 (1) = 0.658$; $p = 0.417$), ni en pariétal droit ($\chi^2 (1) = 1.29$; $p = 0.256$).

Dans la région pariétale droite, les analyses de comparaison par paires (Wilcoxon) montrent des taux de Hb0 plus élevé dans le groupe « contre-mesure » que dans le groupe « test » lors du 5^{ème} jour d'immersion ($p = 0.04$). Aucune variation significative des taux de Hb0 n'a été montré en pariétal droit entre les deux groupes ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 69**).

Pour la région pariétale, il n'existe pas d'effet global spécifique lié à l'immersion latéralisé à gauche ($\chi^2 (4) = 1.73$; $p = 0.785$), ni à droite ($\chi^2 (4) = 2.97$; $p = 0.563$) dans le groupe « test » lors des différentes sessions d'expérimentations de pré-immersion à post-immersion.

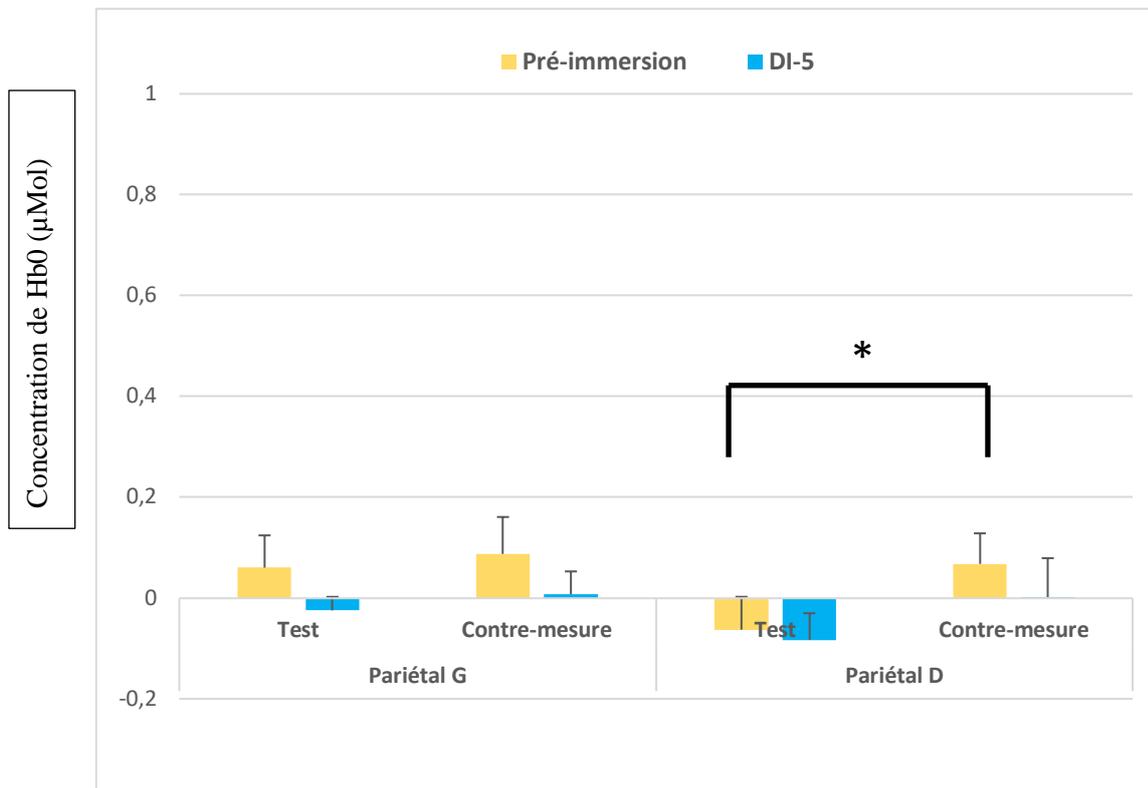


Figure 69 : Concentration de Hb0 (erreur type) (µMol) dans les régions pariétales gauche et droite au cours de la tâche de prise de perspective lors des sessions de pré-immersion (bâtonnets jaunes) et au 5^{ème} jour d'immersion (bâtonnets bleus) dans les deux groupes.

1.2.2. Analyse des fixations oculaires au cours de la tâche de prise de perspective

Nous comparons ici les temps de fixation oculaire (msec) sur les AOI « Avatar », « Objet correct », « Objet incorrect » au cours du 5^{ème} jour d'immersion dans la condition « inclinaison avatar » dans la tâche de prise de perspective entre les deux groupes « test » et « contre-mesure ». Nous avons vérifié si le temps de fixation oculaire sur l'AOI Avatar varie entre les 5 conditions de la tâche de prise de perspective au cours du 5^{ème} jour d'immersion pour chaque groupe. L'analyse de Friedman n'a pas montré de différence significative entre les conditions pour le groupe « test » ($\chi^2(4) = 6.53$; $p = 0.163$), ni pour le groupe « contre-mesure » ($\chi^2(4) = 3.33$; $p = 0.504$). Cependant, l'analyse de comparaison par paires entre les deux groupes pour chaque condition montre des temps de fixations oculaires sur l'AOI Avatar significativement plus longs pour le groupe « test » dans les conditions « prise de perspective standard », « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente », respectivement ($p = 0.016$; $p = 0.031$; $p = 0.016$). Les autres comparaisons entre les deux groupes (« perception directe » et « inclinaison étagère ») ne montrent pas de différences significatives ($p > .05$ pour les deux comparaisons).

Dans la condition « inclinaison avatar », les temps de fixation oculaires sont significativement plus longs dans le groupe « test » que dans le groupe « contre-mesure » sur l'AOI Avatar ($p = 0.016$) et sur l'AOI Objet correct ($p = 0.031$). Il n'y a pas de différence significative du temps de fixation sur l'AOI Objet incorrect entre les deux groupes (cf. **Figure 70**).

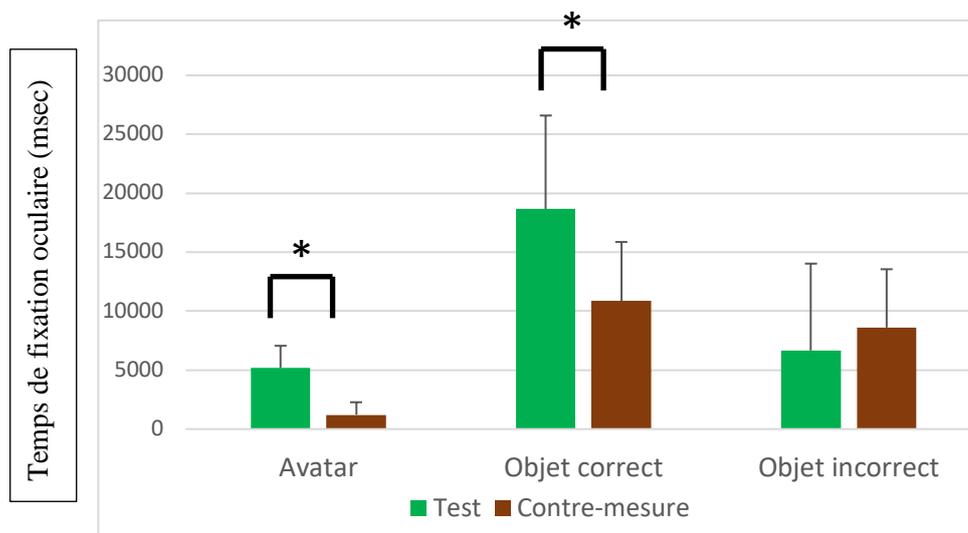


Figure 70 : Temps de fixation oculaire par AOI (avatar, objet correct, objet incorrect) et ET (msec) dans la condition « inclinaison avatar » au cours de la tâche de prise de perspective au 5^{ème} jour d'immersion ($p < .05^*$).

Dans la condition « inclinaison avatar », les nombres moyens de fixations oculaires suivent la même allure que pour le temps de fixation cumulé par AOI. En effet, le nombre moyen de fixations oculaires est significativement plus long dans le groupe « test » que dans le groupe « contre-mesure » sur l'AOI Avatar ($p = 0.018$) et sur l'AOI Objet correct ($p = 0.049$). De même, il n'y a pas de différence significative du temps de fixation sur l'AOI Objet incorrect entre les deux groupes (cf. **Figure 71**).

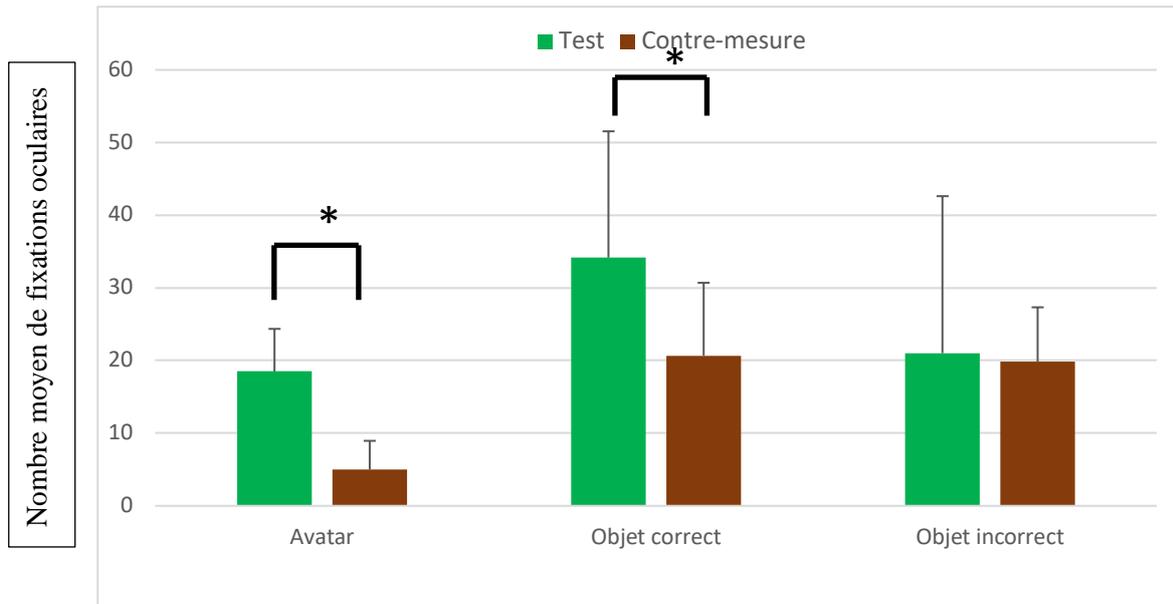


Figure 71 : Nombre moyen de fixations oculaires par AOI et ET dans la condition « inclinaison avatar » au cours de la tâche de prise de perspective au 5^{ème} jour d'immersion ($p < .05^*$).

1.2.3. Impact des différences interindividuelles : le style cognitif

Nous nous intéresserons aux données pré-immersion afin de distinguer les participants visuo-dépendants, de ceux visuo-indépendants. Les sujets 1, 2, 3, 9, 10 et 12 sont manquants car les données en pré-immersion n'ont pas été exploitables.

Tableau 8 : Degré de déviation de l'angle par rapport à la verticale pour les essais sans cadre au test évaluant le style cognitif des participants.

GROUPE	SUJETS	Degré de déviation de l'angle – essais sans cadre	
		Inclinaison de la baguette à gauche	Inclinaison de la baguette à droite
Test	E	1,47	0,58
	F	0,6	-0,3
	K	2,04	1,26
	M	-2,32	-2,38
	O	-0,52	-0,68
	Q	-5,18	-5,96
	S	-0,42	-2,04
Contre-mesure	D	-14,44	-3,46
	G	1,06	1,06
	H	-1,62	-1,52
	N	-1	-1,86
	P	-1,9	-1,44
	R	1,02	4,24

Tableau 9 : Degré de déviation de l'angle par rapport à la verticale dans les essais avec cadre pour chaque participant.

GROUPE	SUJETS	Inclinaison du cadre (+/-18°) et de la baguette (+/-20°)			
		DD (+18° ; +20°)	GD (-18° ; +20°)	DG (+18° ; -20°)	GG (-18° ; -20°)
Test	E	-9,6	-10,2	-5,5	-12
	F	1,05	-1,6	-0,05	-0,55
	K	0,2	0,1	1	3,65
	M	0,3	1,15	1,45	1
	O	-0,9	-1,4	-0,95	-2,25
	Q	2,77	0,8	1,4	0,8
	S	-2,7	-5,4	-1,8	-1,13
Contre-mesure	D	-1,26	-4,55	-1,2	-3,3
	G	-17,15	-20,2	-17,5	-20,1
	H	-1,57	-3,95	-2,2	-3,63
	N	-4,6	-4,65	-5,8	-2,47
	P	0,95	1,6	2,3	1,1
	R	-0,85	-1,05	-1,13	-0,43

Six participants sont donc considérés être « dépendants du champ visuel », dont 3 participants du groupe « test » et 3 participants du groupe « contre-mesure ». Parmi les sept

participants considérés « **indépendants du champ visuel** », 4 participants font partie du groupe « test » et 3 participants du groupe « contre-mesure ». L'objectif est de comparer les performances des participants de chaque groupe « test » et « contre-mesure » pour chaque style cognitif au cours du 5^{ème} jour d'immersion dans la condition « inclinaison avatar » de la tâche de prise de perspective.

Les comparaisons par paires n'ont pas montré de différences significatives des temps de réponses entre les individus dépendants et indépendants du champ visuel dans les deux groupes « test » et « contre-mesure » au cours des sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 72**).

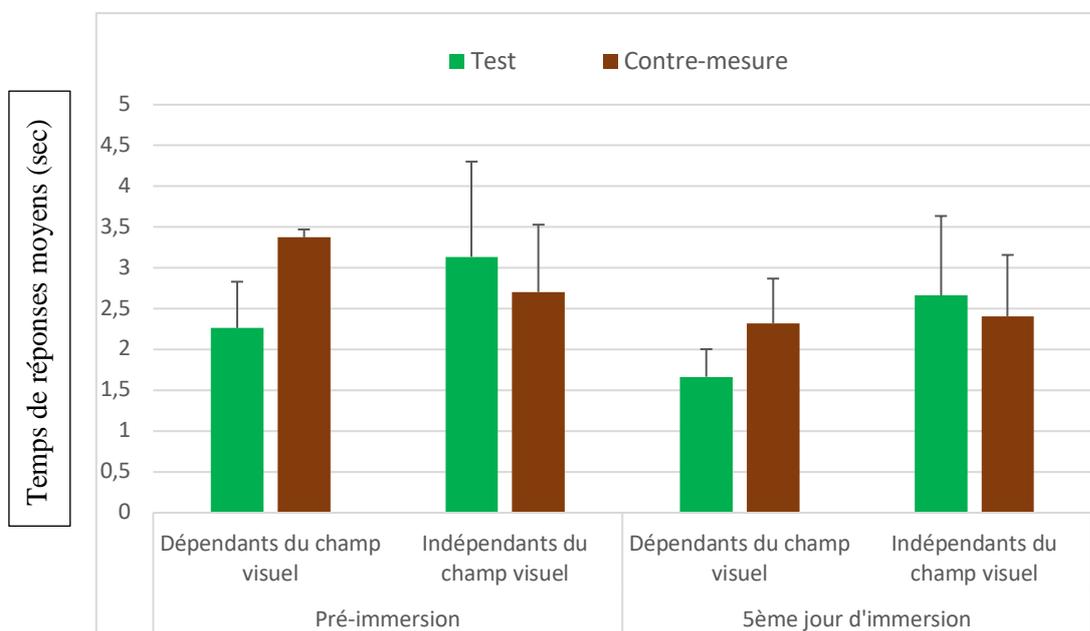


Figure 72 : Temps de réponses moyens et ET (en secondes) pour chaque sous-groupe de style cognitif lors des phases de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion dans les deux groupes test (bâtonnets en vert) et contre-mesure (bâtonnets en marron).

De plus, les taux de réponses correctes ne varient pas significativement entre les individus dépendants et indépendants du champ visuel dans les deux groupes « test » et « contre-mesure » au cours des sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 73**).

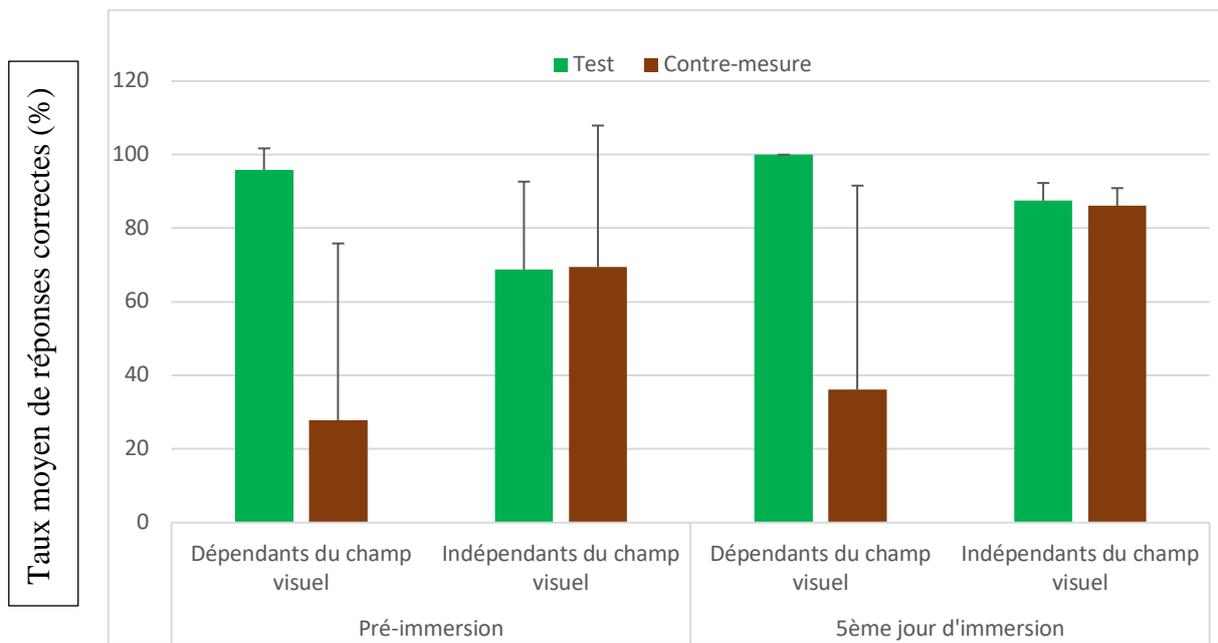


Figure 73 : Taux moyen de réponses correctes et ET (%) pour chaque sous-groupe de style cognitif lors des phases de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion dans les deux groupes test (bâtonnets en vert) et contre-mesure (bâtonnets en marron).

2. Analyse des capacités de rotation mentale

Nous rappelons que l'objectif principal de cette tâche est de vérifier les capacités de transformations mentales allocentrées en distinguant les angles au-dessus de l'horizon visuel (60° et 300°) et les angles en-dessous de l'horizon visuel (120° et 240°), pour les deux groupes. Comme dans l'étude de Cooper & Shepard (1973) (cf. 1.1), dans les essais avec flèche, les temps de réponses et les taux de réponses correctes ne seraient pas impactés par le degré de rotation du stimulus. Au contraire, dans les essais sans flèche, les performances seraient inférieures dans les essais où le stimulus subit une inclinaison de 120° et de 240° par rapport aux conditions où il subit une inclinaison moindre, de 60° et de 300°, étant donné que l'angle de la rotation mentale à réaliser est plus important dans le premier que dans le second cas .

Dans les essais avec flèche, les comparaisons par paires montrent des temps de réponses moyens similaires entre les deux conditions d'angles dans les deux groupes entre les sessions de pré-immersion et du 5^{ème} jour d'immersion ($p > .05$ pour toutes les comparaisons), ce qui confirme notre hypothèse. On remarque cependant que les performances des deux groupes ne sont pas équivalentes en pré-immersion avec des TR significativement plus longs dans le groupe « contre-mesure » que dans le groupe « test » dans les deux conditions d'angles supérieurs et inférieurs (respectivement, $p = 0.039$; $p = 0.045$) (cf. **Figure 74**).

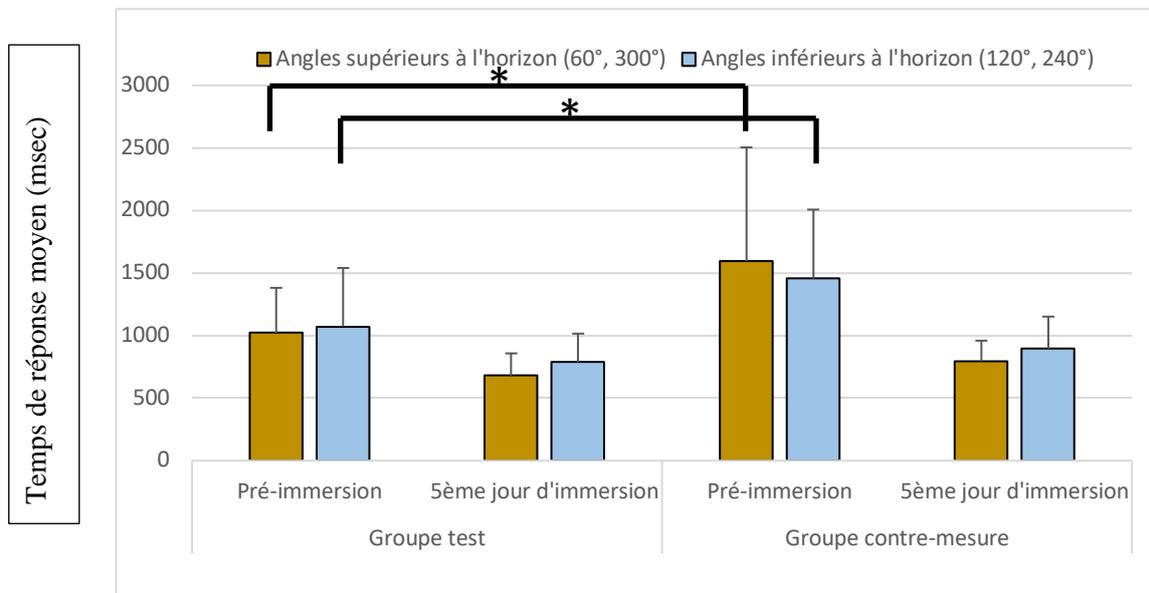


Figure 74 : Temps de réponse moyen et ET (msec) au cours des essais avec flèche de la tâche de rotation mentale, dans les conditions d'angles supérieurs à l'horizon (bâtonnets marrons) et d'angles inférieurs à l'horizon (bâtonnets bleus) dans les deux groupes test et contre-mesure au cours des sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion ($p < .05^*$).

Aucune différence significative n'a été montrée concernant le nombre de réponses correctes (max. 4) dans les deux conditions d'angles lors des essais avec flèche, entre les deux groupes, ni entre les deux sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 75**).

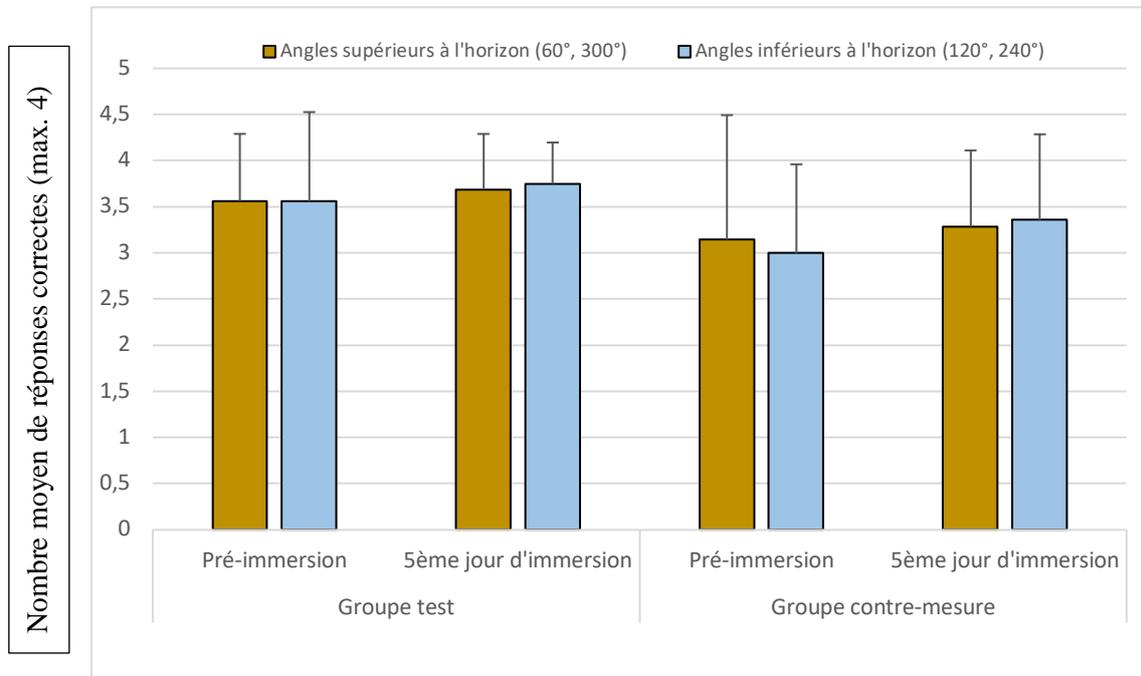


Figure 75 : Nombre moyen de réponses correctes et ET (max. 4) dans les essais avec flèche, par condition d'angle : supérieurs à l'horizon (bâtonnets marrons) et inférieurs à l'horizon (bâtonnets bleus) dans les deux groupes « test » et « contre-mesure » au cours des sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion.

Pour les essais sans flèche, les comparaisons par paires montrent des temps de réponses moyens significativement plus élevés dans la condition d'angles inférieurs à l'horizon par rapport à la condition où les angles sont supérieurs à l'horizon uniquement dans le groupe « test » en pré-immersion ($p = 0.005$) et au 5^{ème} jour d'immersion ($p = 0.007$). Cependant, ce n'est pas le cas pour le groupe « contre-mesure » où les TR ne diffèrent pas significativement entre les deux conditions d'angles ($p > .05$) entre les deux groupes entre les deux sessions ($p > .05$) (cf. **Figure 76**).

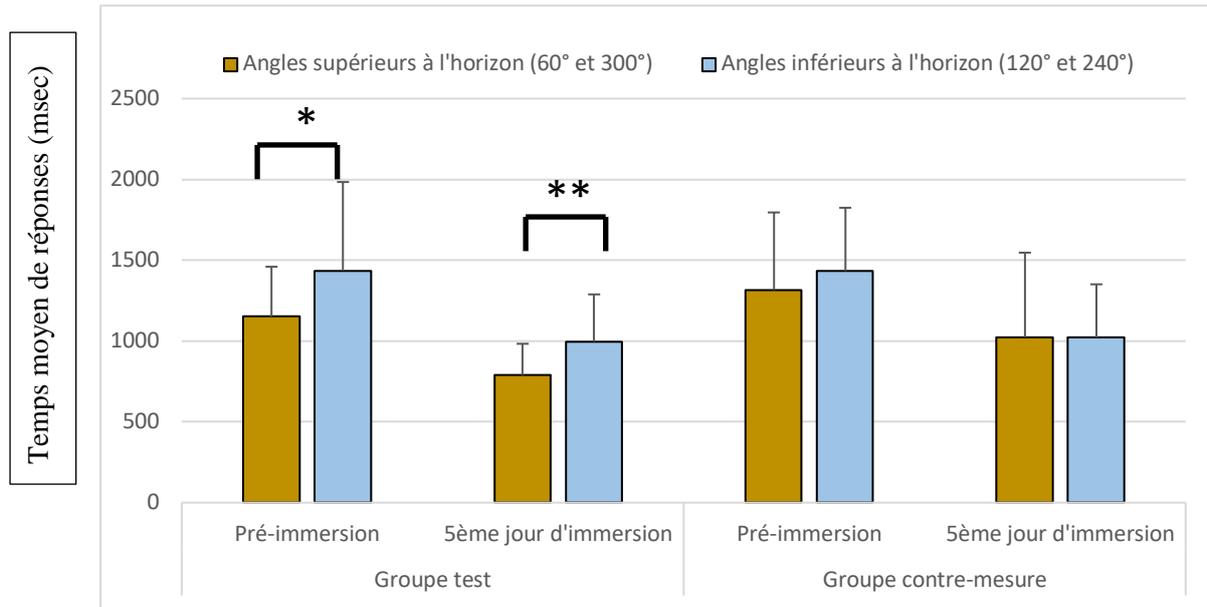


Figure 76 : Temps de réponse moyen et ET (msec) au cours des essais sans flèche de la tâche de rotation mentale, dans les conditions d'angles supérieurs à l'horizon (bâtonnets marrons) et d'angles inférieurs à l'horizon (bâtonnets bleus) dans les deux groupes test et contre-mesure au cours des sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion

Par ailleurs, le nombre de réponses correctes (max. 4) ne diffère pas significativement entre les deux conditions d'angles lors des essais sans flèche entre les groupes, ni entre les deux sessions ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 77**).

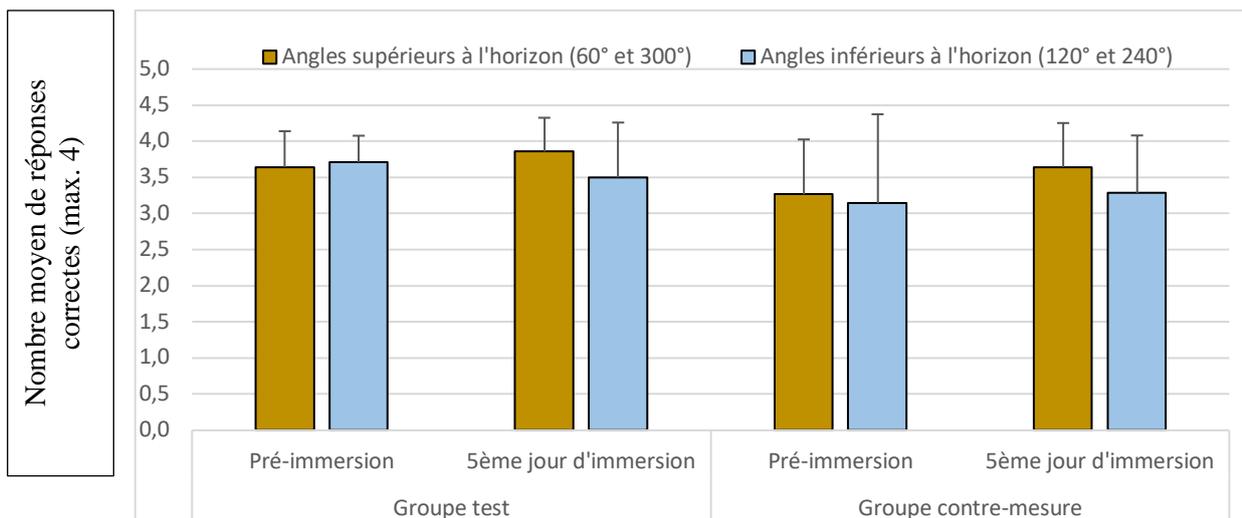


Figure 77: Nombre moyen de réponses correctes et ET (max. 4) par condition d'angle dans les essais sans flèche : supérieurs à l'horizon (bâtonnets marrons) et inférieurs à l'horizon (bâtonnets bleus) dans les deux groupes « test » et « contre-mesure » au cours des sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion.

3. Effets de l'immersion sèche sur les fonctions exécutives

▪ Effet de l'immersion sur la vigilance

Les analyses à l'aide du test de Wilcoxon des TR dans la tâche de temps de réaction simple ne montrent pas de différences significatives entre les temps de réactions recueillis en pré-immersion et en DI-5 pour aucun des deux groupes, ni entre les groupes ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 78**).

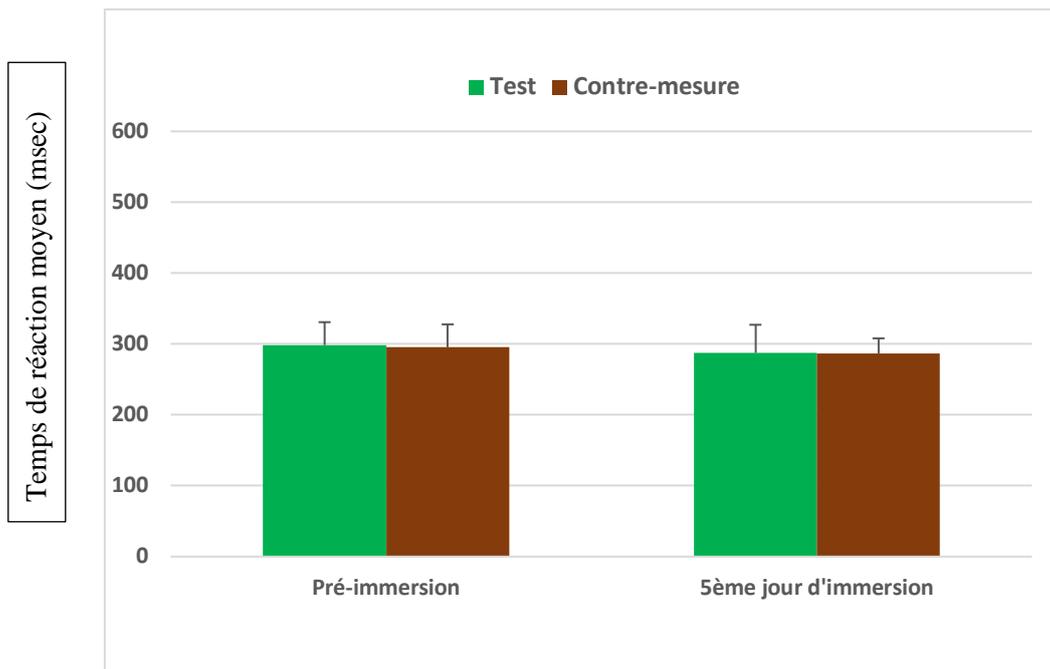


Figure 78 : Comparaison des temps de réactions moyens (msec) pour chaque groupe au cours de deux sessions d'expérimentation : pré-immersion et DI-5.

- Effets de l'immersion sur les capacités d'inhibition, de mémoire de travail et d'attention

- Effets de l'immersion sur les capacités d'inhibition

Les temps de réponses diminuent significativement entre la session de pré-immersion et le 5^{ème} jour d'immersion dans le groupe « test » ($p = 0.05$) et dans le groupe contre-mesure ($p = 0.027$). Aucune autre différence significative des temps de réponses n'a été montrée entre les groupes lors des deux sessions d'expérimentations ($p > .05$ pour toutes les comparaisons). (cf. **Figure 79**).

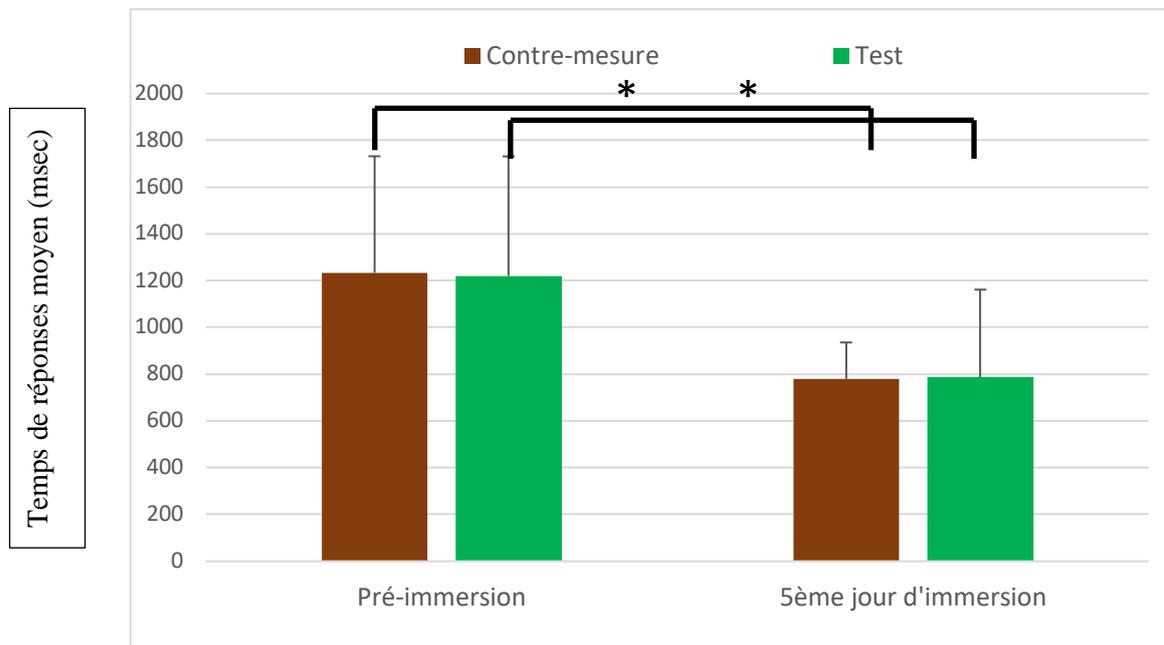


Figure 79 : Temps de réponses moyens et ET (msec) dans la condition interférence au cours des sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion pour les deux groupes « contre-mesure » (bâtonnets marrons) et « test » (bâtonnets verts).

Le nombre d'erreurs est plus élevé dans la condition d'interférence a été montré pour le groupe « test » par rapport au groupe « contre-mesure » au cours du 5^{ème} jour d'immersion ($p = 0.049$). En revanche, les taux de réponses correctes n'évoluent pas de manière significative entre les deux sessions d'expérimentations pour aucun des deux groupes ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 80**).

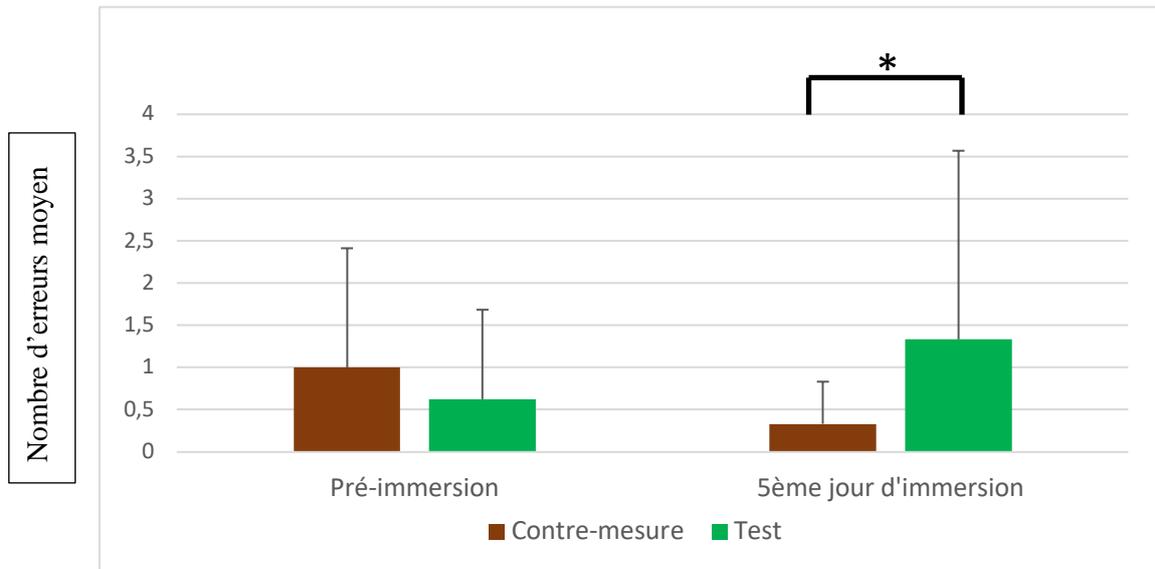


Figure 80 : Nombre moyen d'erreurs dans la condition interférence au cours des sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion pour les deux groupes « contre-mesure » (bâtonnets marrons) et « test » (bâtonnets verts).

- **Effet de l'immersion sur la mémoire à court terme et la mémoire de travail**

Cette tâche renvoie à l'analyse des performances sur deux empan : l'empan endroit qui sollicite la mémoire à court terme et l'empan envers qui sollicite davantage la mémoire de travail. Les comparaisons par paire ne montrent aucune différence significative de l'empan mnésique endroit entre les sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion, ni entre les deux groupes ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 81**).

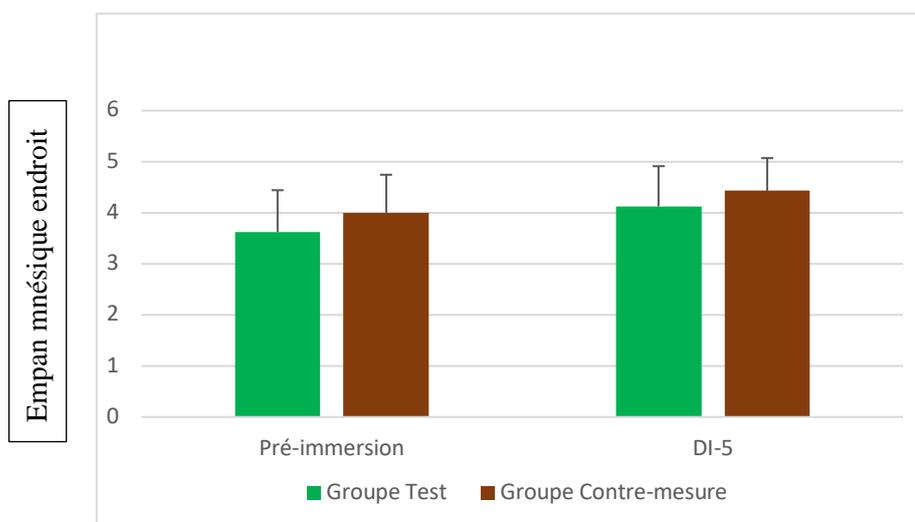


Figure 81: Empan mnésique endroit (rétention d'une série de chiffres en mémoire à court terme) pour les deux groupes test (bâtonnets verts) et contre-mesure (bâtonnets marrons) en pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion.

Pour l’empan mnésique envers, aucune différence significative entre les sessions de pré-immersion et au 5^{ème} jour d’immersion, ni entre les deux groupes n’a été mise en évidence ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 82**).

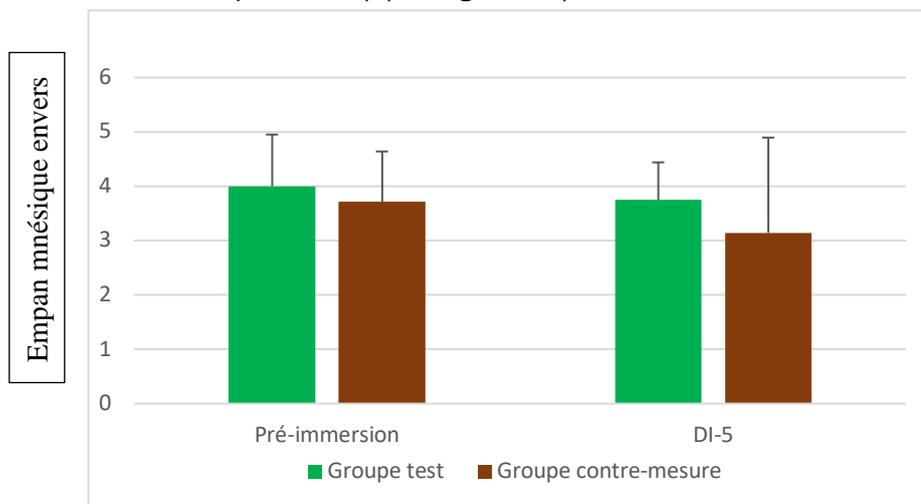


Figure 82 : Empan mnésique envers (rétention d’une série de chiffres en mémoire de travail) pour les deux groupes test (bâtonnets verts) et contre-mesure (bâtonnets marrons) en pré-immersion et au 5^{ème} jour d’immersion.

- **Effet de l’impesanteur sur l’attention**

Dans cette analyse, nous parlerons de performance avec l’indice de performance qualitative qui correspond au pourcentage d’erreurs (F%) durant la tâche d’attention et l’indice de concentration (KL). Lorsque l’indice de concentration est élevé (KL), l’indice de performance qualitative sera faible, et inversement.

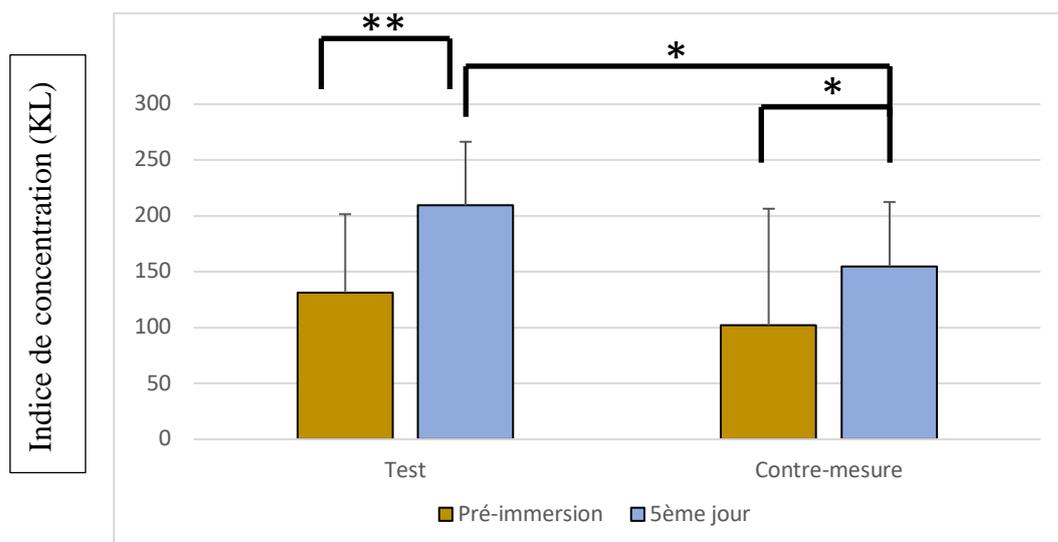


Figure 83 : Indice de concentration et ET (KL) lors du test d’attention D2 au cours des sessions de pré-immersion (bâtonnets jaunes) et au 5^{ème} jour d’immersion (bâtonnets bleus) pour les deux groupes test et contre-mesure ($p < .05^*$; $p < .01^{**}$).

Tout d'abord, l'indice de concentration (KL) est plus élevé dans les deux groupes « test » et « contre-mesure » au cours du 5^{ème} jour d'immersion comparativement à la session en pré-immersion ($p = 0.002$, $p = 0.027$). Il n'y a pas de différences significatives en pré-immersion entre les deux groupes ($p = 0.633$), mais le groupe « test » montre un indice de concentration significativement plus élevé que le groupe « contre-mesure » au 5^{ème} jour d'immersion ($p = 0.037$) (cf. **Figure 83**).

Concernant l'indice de performance qualitative c'est-à-dire le pourcentage d'erreurs (F%), celui-ci diminue significativement uniquement pour le groupe « test » entre la session en pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion ($p = 0.027$). Aucune différence significative n'est observée entre le groupe « test » et « contre-mesure » à la session de pré-immersion ($p = 0.674$), ni au 5^{ème} jour d'immersion ($p = 0.213$) (cf. **Figure 84**).

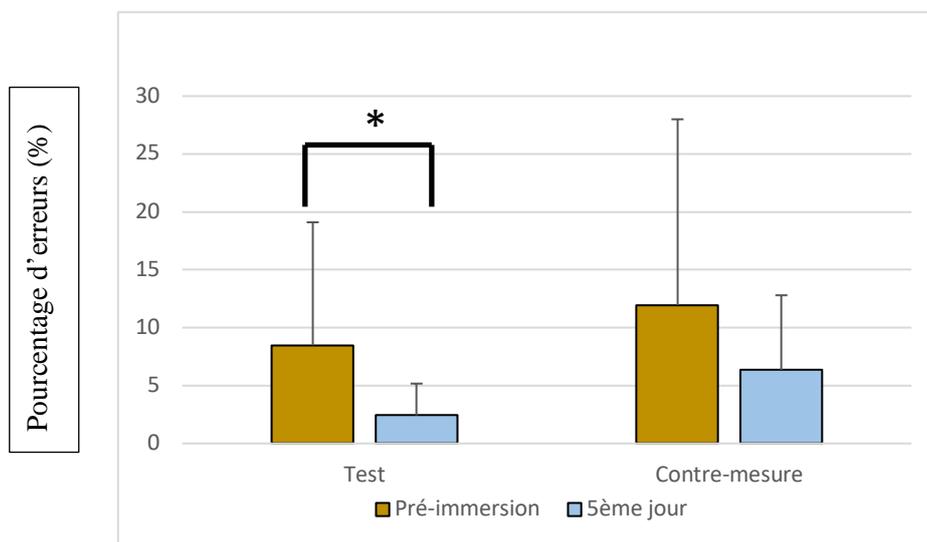


Figure 84 : Indice de performance qualitative (pourcentage d'erreurs ; F%) lors du test d'attention D2 au cours des sessions de pré-immersion (bâtonnets jaunes) et au 5^{ème} jour d'immersion (bâtonnets bleus) pour les deux groupes test et contre-mesure ($p < .05^*$).

Pour résumer, cette tâche montre que la concentration est plus élevée lors du 5^{ème} jour d'immersion dans les deux groupes « test » et « contre-mesure » avec des pourcentages d'erreurs plus faibles au cours du 5^{ème} jour d'immersion.

- **Activation des structures cérébrales impliquées dans les fonctions exécutives**

Dans la région préfrontale, aucun effet principal entre les deux groupes « test » et « contre-mesure » sur la concentration en Hb0 n'a été montré en préfrontal gauche ($\chi^2 (1) = 0.474$; $p = 0.491$), ni en préfrontal droit ($\chi^2 (1) = 0.211$; $p = 0.646$). Aucun effet spécifique lié à l'immersion n'a été montré dans le groupe « test » lors des différentes sessions d'expérimentations latéralisé à gauche ($\chi^2 (4) = 1.33$; $p = 0.856$), ni à droite ($\chi^2 (4) = 7.13$; $p = 0.129$) (cf. **Figure 85**).

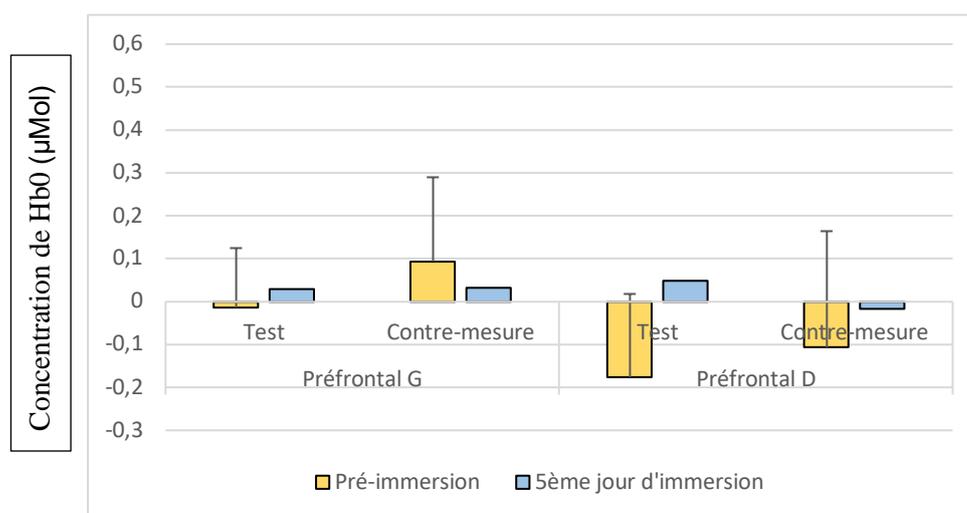


Figure 85 : Concentration de Hb0 (erreur type) (µMol) dans les régions préfrontales gauche et droite au cours de la tâche de prise de perspective lors des sessions de pré-immersion (bâtonnets jaunes) et au 5^{ème} jour d'immersion (bâtonnets bleus) dans les deux groupes.

Dans la région frontale, aucun effet principal entre les deux groupes « test » et « contre-mesure » sur la concentration en Hb0 n'a été montré en frontal gauche ($\chi^2 (1) = 0.877$; $p = 0.349$), ni en frontal droit ($\chi^2 (1) = 0.0351$; $p = 0.851$). Cependant, **dans la région frontale gauche**, un effet spécifique lié à l'immersion dans le groupe « test » est montré ($\chi^2 (4) = 11.6$; $p = 0.021$). Les analyses de comparaisons par paires (Durbin-Conover) montrent une chute significative de l'oxyhémoglobine (Hb0) au cours du troisième jour d'immersion par rapport aux autres sessions d'expérimentations ($p < .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 86**).

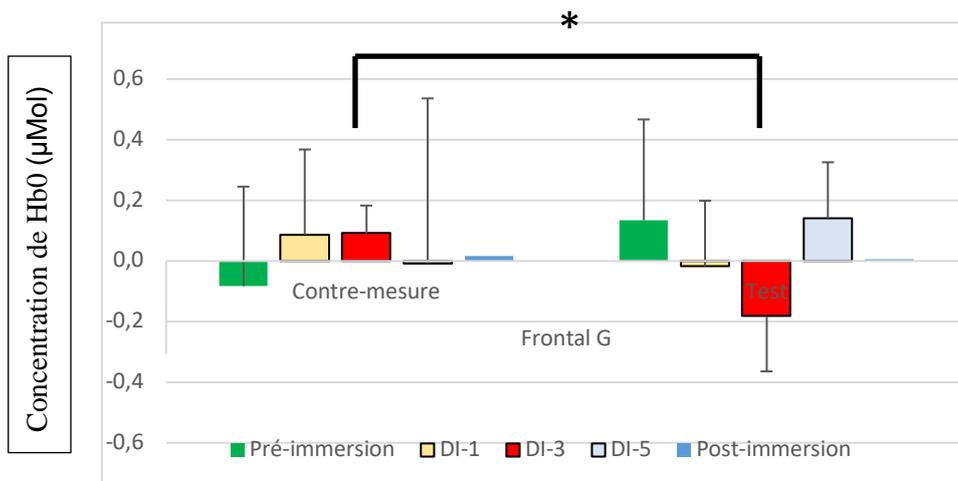


Figure 86 : Concentration de Hb0 (erreur type) (µMol) dans la région frontale gauche au cours de la tâche de prise de perspective lors des différentes sessions de pré-immersion à post-immersion dans les deux groupes ($p < .05^*$).

Dans la région frontale droite, aucun effet spécifique lié à l'immersion dans le groupe « test » n'est mis en évidence ($\chi^2(4) = 7.42$; $p = 0.115$), cependant, les comparaisons par paires (Wilcoxon) montrent un taux de Hb0 plus élevé dans le groupe « test » au 5^{ème} jour d'immersion ($p = 0.018$) (cf. **Figure 87**).

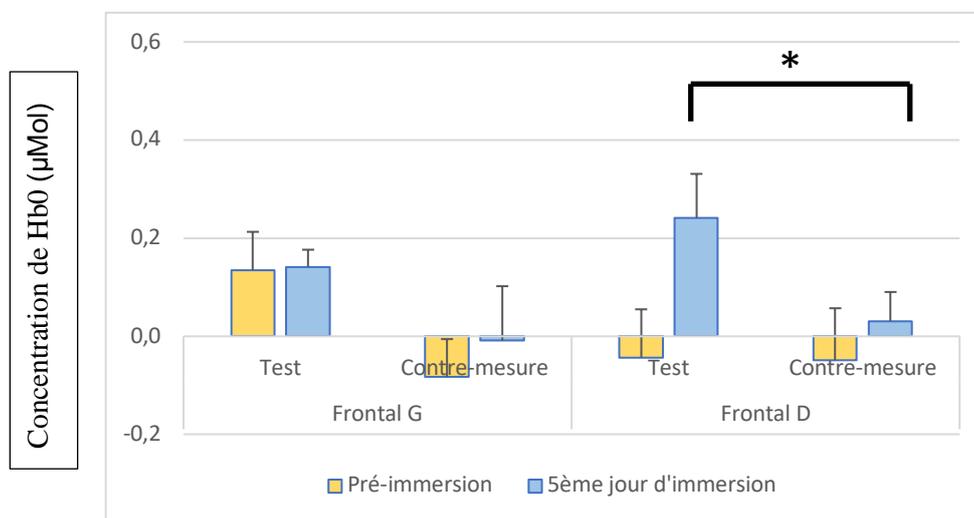


Figure 87 : Concentration de Hb0 (erreur type) (µMol) dans les régions frontales gauche et droite au cours de la tâche de prise de perspective lors des sessions de pré-immersion (bâtonnets jaunes) et au 5^{ème} jour d'immersion (bâtonnets bleus) dans les deux groupes ($p < .05^*$).

Suivi de l'état général des participants

➤ Questionnaire de Saint Antoine

Concernant les **indices sensoriels**, les courbes montrent des douleurs plus importantes dans le groupe « test » que dans le groupe « contre-mesure » qui diminuent au 5^{ème} jour d'immersion. Cependant, les analyses de Wilcoxon n'ont montré aucune différence significative entre les groupes pour les différentes sessions de tests ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 88**).

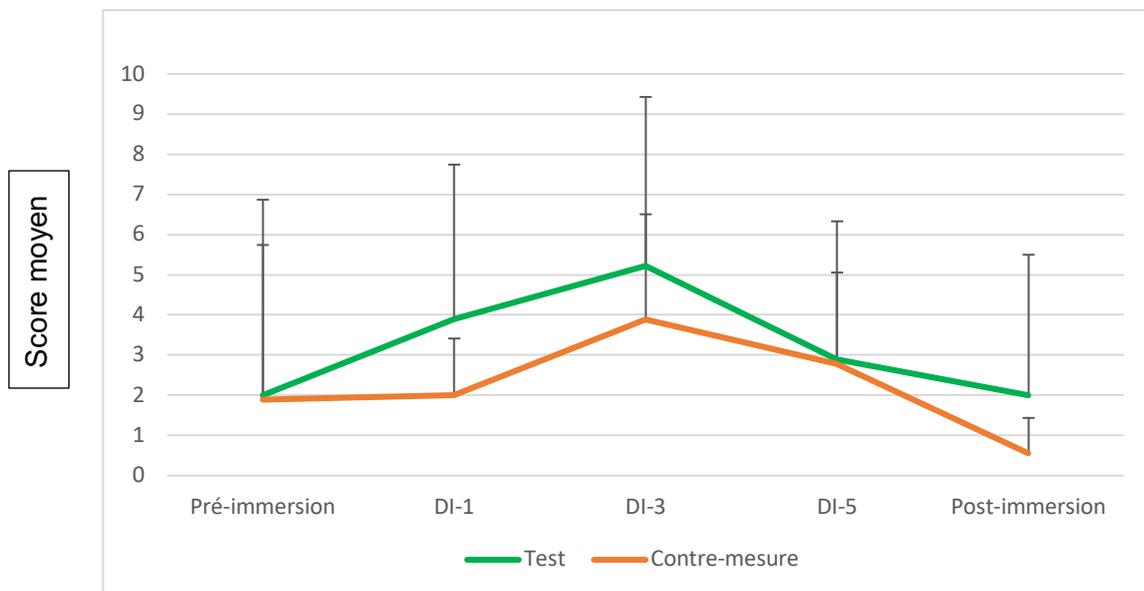


Figure 88 : Score moyen et ET pour les **Indices sensoriels** pour les deux groupes de participants à chaque session de tests (de pré-immersion à post-immersion).

Concernant les **indices affectifs**, les courbes montrent une tendance inverse avec une augmentation de la douleur « affective » dans le groupe « contre-mesure » par rapport au groupe « test ». Cependant, comme pour les indices sensoriels, les analyses de Wilcoxon n'ont montré aucune différence significative entre les groupes pour les différentes sessions de tests ($p > .05$ pour toutes les comparaisons) (cf. **Figure 89**).

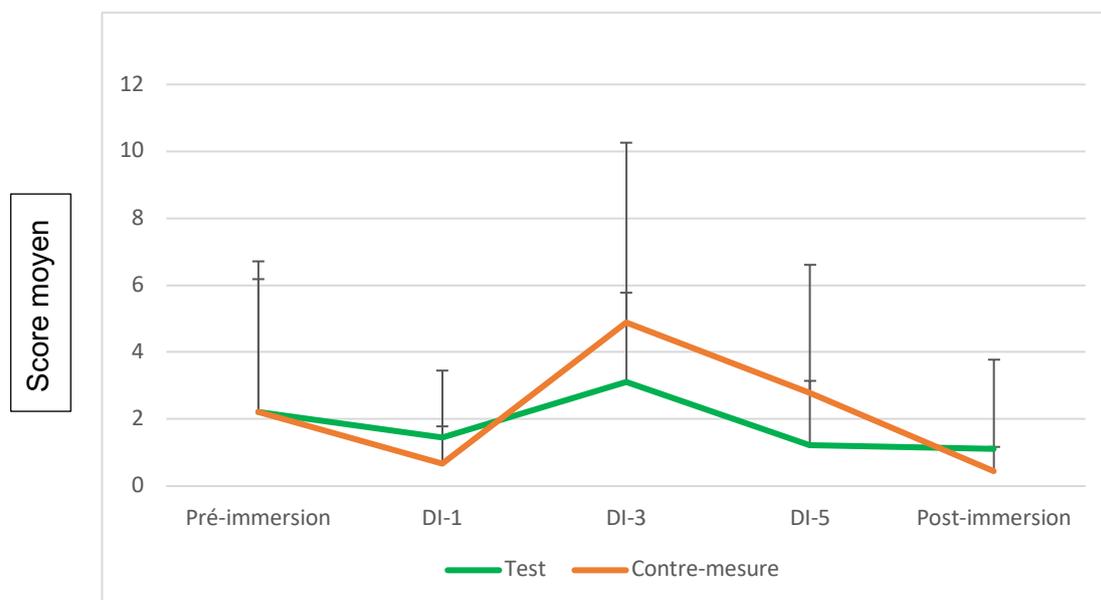


Figure 89 : Score moyen et ET pour les **Indices affectifs** pour les deux groupes de participants à chaque session de tests (de pré-immersion à post-immersion).

➤ **Autres questionnaires soumis aux participants par (Robin et al., 2020) au cours de l'immersion sèche**

Plusieurs questionnaires ont permis d'évaluer différents indices portant sur l'état général des participants tels que la qualité du sommeil, l'inconfort général, les douleurs au niveau du dos et l'inconfort vis-à-vis du port des brassards de cuisse. Le groupe dit « control » correspond au groupe « test » et le groupe dit « cuffs » correspond au groupe « contre-mesure » de notre étude. Ces questionnaires ont été complétés une fois par jour pour l'auto-évaluation de la qualité du sommeil et deux fois par jour pour les autres indicateurs (Robin et al., 2020) (cf. **Annexe 9**).

La qualité du sommeil apparaît diminuée dans les deux groupes à partir du 1^{er} jour d'immersion. L'inconfort général et des douleurs au dos apparaissent également à partir du 1^{er} jour d'immersion (cf. **Figure 90**). Ces données permettent de compléter nos observations sur l'état de santé général des participants au cours de l'immersion.

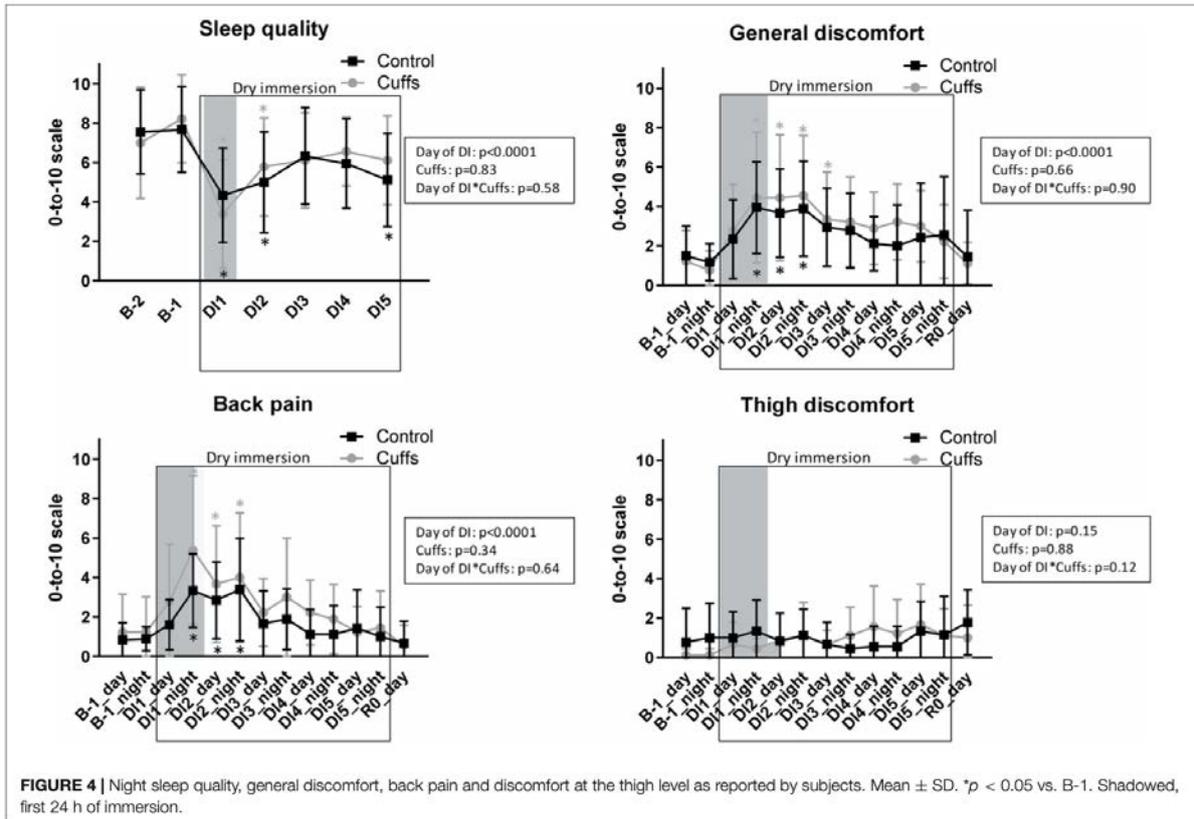


Figure 90 : Questionnaires proposés aux participants par Robin et al. (2020) au cours du protocole d'immersion sèche

III. Discussion

Cette seconde expérimentation avait pour but de tester si l'impact de la perturbation du système proprioceptif en immersion sèche se traduisait également par une amélioration des performances de prise de perspective d'autrui dans les conditions nécessitant l'utilisation d'un cadre de référence égocentré. Dans la continuité de la première expérience, nous avons inclus à notre protocole des mesures physiologiques. Par ailleurs, l'évaluation des processus cognitifs non-sociaux nous a permis de tester la spécificité de l'effet de facilitation, autrement dit si cet effet de facilitation dans la tâche de prise de perspective pouvait s'expliquer par le recours à d'autres processus, non-sociaux, tels que les processus exécutifs. Il convient d'être prudent avec l'interprétation de ces résultats car nous ne disposons pas d'un groupe contrôle mais d'un groupe contre-mesure qui subit les effets de l'immersion en portant les brassards de cuisse qui devraient théoriquement atténuer ces effets en limitant le déplacement des fluides corporels vers le haut du corps (Robin et al., 2020). Aussi, l'interprétation des résultats de cette seconde expérimentation portera sur les effets de la contre-mesure.

Comme pour l'expérience 1, nous postulons que la réduction des entrées proprioceptives faciliterait les performances de prise de perspective égocentrée dans les conditions critiques « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » de la tâche de prise de perspective pour le groupe « test » au 5^{ème} jour d'immersion par rapport au groupe « contre-mesure ». Nos résultats confirment en partie notre hypothèse et montrent que **des temps de réponses significativement plus rapides dans le groupe « test »** par rapport au groupe « contre-mesure » **au 5^{ème} jour d'immersion uniquement dans la condition « inclinaison avatar »**. Les taux de réponses correctes ne diffèrent pas entre les deux groupes au 5^{ème} jour d'immersion dans les conditions de prise de perspective égocentrée. Nous obtenons des résultats globalement similaires à l'étude 1, bien que seule la condition « inclinaison avatar » montre des temps de réponses significativement plus rapides. Ce résultat suggère que l'utilisation d'un tunnel pour exclure les informations de l'environnement visuel serait aussi efficace que l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle. Contrairement à notre hypothèse, le style cognitif des participants n'a pas influencé les performances de prise de perspective d'autrui, contrairement à l'étude 1 dans laquelle les participants visuo-indépendants avaient des temps de réponses plus rapides que les visuo-dépendants en 0g. Dans l'étude 1, nous avons cumulé les données des deux conditions « inclinaison avatar » et « inclinaison congruente » car les temps de réponses différaient tous deux significativement en 0g comparativement aux phases de 1g en vol. Puisque dans la seconde étude, seuls les temps de réponses dans la condition « inclinaison avatar » sont significativement plus rapides dans

le groupe test au 5^{ème} jour d'immersion que dans le groupe « contre-mesure ». Ainsi, une variabilité individuelle plus importante des performances pourrait expliquer l'absence de différence en fonction du style cognitif.

Sur le plan physiologique, la région corticale temporale gauche est significativement plus activée dans le groupe « test » au 5^{ème} jour d'immersion par rapport à la session de pré-immersion lors de la tâche de prise de perspective. Cet effet ne s'observe pas pour le groupe « contre-mesure ». Ces résultats confirment en partie notre hypothèse car elle proposait une activation globale du cortex temporal. Dans les analyses statistiques, nous avons moyenné les taux d'Hb0 sur l'ensemble de la tâche, sans différencier les conditions entre elles car les temps de réponses étaient trop courts pour exploiter chaque essai dans chacune des conditions avec la NIRS. Nous proposons donc que cette augmentation de l'oxygénation au niveau de la région temporale était présente tout au long de la réalisation de la tâche de prise de perspective. Comme l'a montré Matar_Touma_(2021), l'appui sur la représentation corporelle de soi, c'est-à-dire le schéma corporel, intervient lorsqu'il s'agit de prendre la perspective d'autrui et la région temporale est ainsi activée lorsque le schéma corporel n'est pas encore totalement abouti dans l'enfance. Il est donc probable que la diminution des entrées proprioceptives pour les participants du groupe « test » impacterait la représentation sensorimotrice de leur propre corps ce qui nécessiterait l'activation des structures temporales pour prendre la perspective d'autrui. L'activation de la zone temporale pourrait refléter un effort mental supplémentaire nécessaire pour prendre la perspective d'une autre personne alors que s'appuyer sur un cadre de référence égocentré nécessite de prendre appui sur son propre corps pour effectuer ce type de transformations mentales (Hirai_et_al.,_2020). De plus, la région temporale serait également activée lors d'expériences de désincarnation ou de scènes imaginaires (Arzy et al., 2006), ce qui peut expliquer l'activation temporale dans la tâche de prise de perspective puisque le participant se projetterait dans la position de l'avatar en utilisant une représentation incarnée de ce dernier. Alternativement, nous suggérons que cette région corticale était activée tout simplement du fait qu'il s'agit d'une tâche impliquant de prendre la perspective d'autrui, capacité également reconnue sous le terme de « théorie de l'esprit ». En effet, Abu-Akel & Shamay-Tsoory (2011) montrent qu'un réseau cortical spécifique incluant la région temporale est impliqué dans les représentations des états mentaux de soi et d'autrui. Le sulcus temporal supérieur serait activé dans la prise en compte d'autrui mais non pas dans la prise en compte de soi. Par ailleurs, il convient de rester prudent car les régions temporales peuvent s'activer également dans des tâches nécessitant le recours à des processus attentionnels, la tâche de prise de perspective étant complexe, les participants peuvent avoir recours à ces processus lors de la résolution des différentes conditions de la tâche (Abu-Akel & Shamay-Tsoory, 2011).

Par ailleurs, notre hypothèse supposait également une activation pariétale plus faible au cours de la tâche de prise de perspective dans le groupe « test » puisque l'orientation physique de son propre corps ne serait pas prise en compte dans la tâche (Waller et al., 2002). Nos résultats valident cette hypothèse en montrant que la région corticale pariétale droite dans le groupe « test » est sous-activée par rapport au groupe « contre-mesure » lors du 5^{ème} jour d'immersion. Le rôle du cortex pariétal serait d'établir des liens entre l'orientation du corps physique et sa relation avec les objets de l'environnement, ainsi les informations issues du corps physique étant amoindries dans le groupe « test », le cortex pariétal est moins activé lors de la tâche que dans le groupe « contre-mesure ». Keehner et al.(2006) ont également montré que lorsqu'un individu s'imagine se projeter dans une autre position dans l'espace, le cortex pariétal est nettement moins activé.

Les temps de fixation oculaires observés au cours de la tâche de prise de perspective confortent également nos hypothèses. En effet, **le temps et le nombre de fixations oculaires sur l'AOI Avatar sont significativement plus élevés pour le groupe « test »** que pour le groupe « contre-mesure » au 5^{ème} jour d'immersion. Les participants passeraient davantage de temps à fixer l'avatar (ou l'endroit sur lequel il apparaît, puisque celui-ci apparaît brièvement au cours de la tâche). Il est donc probable que les participants fassent appel à des capacités de mémoire de travail pour se remémorer la position de celui-ci afin de pouvoir réaliser la tâche. Cependant, les participants du groupe « test » fixent significativement plus longtemps l'avatar que les participants du groupe « contre-mesure ». Glöckner & Herbold (2010) précisent que le temps passé à examiner un élément permet de refléter la profondeur avec laquelle l'information est traitée. Ainsi, un traitement plus profond serait lié à des fixations plus longues (Velichkovsky et al., 2002). Suite à ce qui a été décrit ci-dessus, nous suggérons donc que les participants du groupe « test », en lien avec la diminution des entrées proprioceptives en immersion sèche, prendraient davantage en compte la position de l'avatar afin d'effectuer une représentation mentale incarnée pour se projeter à la place de celui-ci et résoudre la tâche proposée.

Contrairement aux transformations mentales égocentrées, qui seraient facilitées en immersion sèche, nous postulons que le recours à un cadre de référence allocentré est stable au cours de l'immersion dans les deux groupes. En accord avec cela, nos résultats montrent que dans les deux groupes « test » et « contre-mesure », les performances ne varient pas en pré-immersion et au 5^{ème} jour d'immersion. Néanmoins, contrairement à ce que nous avons proposé en accord avec l'étude de Cooper & Shepard (1973), dans la condition « sans flèche », les temps de réponse varient entre les deux conditions d'angles uniquement dans le

groupe « test », mais non pas dans le groupe « contre-mesure ». Les participants du groupe contre-mesure ont des temps de réponses moyens plus élevés mais également un écart-type plus important, il pourrait donc s'agir de différences interindividuelles introduisant une plus importante variabilité des performances dans ce groupe.

Sur le plan exécutif, le nombre d'erreurs d'interférence est significativement plus élevé dans le groupe « test » que dans le groupe « contre-mesure » au 5^{ème} jour d'immersion. Ce résultat est à mettre en lien avec la baisse du nombre d'erreurs observée seulement pour le groupe contre-mesure au 5^{ème} jour par rapport à la phase de pré-immersion, probablement en raison d'un effet de répétition de la tâche d'interférence. Alternativement, des différences d'inhibition pourraient être directement liées à l'immersion sèche, sans pour autant venir impacter la prise de perspective d'autrui. Ainsi, dans le groupe « test », le conflit entre la perspective de soi et celle d'autrui serait moindre (la perspective de soi perturbée par la réduction des entrées proprioceptives), de sorte que le calcul de la perspective de l'avatar s'effectuerait de façon automatique, sans recours aux processus d'inhibition, contrairement au groupe contre-mesure (Qureshi et al., 2010). Par ailleurs, les performances de mémoire à court terme, de mémoire de travail et de vigilance ne témoignent d'aucune différence significative entre les deux groupes et entre les sessions. Ainsi, les capacités de mémoire de travail ne seraient pas perturbées par l'immersion sèche et la charge de travail ne serait pas plus importante dans l'un ou l'autre des deux groupes (Baddeley, 2003).

Les mesures physiologiques ont également permis de contrôler l'activité cérébrale dans les régions qui soutiennent les capacités exécutives tels que les cortex préfrontaux et frontaux. Au niveau des régions préfrontales, aucune différence d'activation cérébrale n'a été montrée entre les deux groupes. Le cortex préfrontal interviendrait dans la distinction entre la perspective de soi et d'autrui (Abu-Akel & Shamay-Tsoory, 2011) ce qui explique son désengagement lors de la tâche de prise de perspective dans le groupe « test » mais cela ne permet pas d'expliquer son désengagement pour le groupe « contre-mesure ». Cependant, au niveau de la région frontale gauche, l'activité corticale est significativement plus faible dans le groupe « test » que dans le groupe « contre-mesure » au 3^{ème} jour d'immersion. Au contraire, l'activité corticale de la région frontale droite est significativement plus importante au 5^{ème} jour d'immersion dans le groupe « test » que dans le groupe « contre-mesure ». Seymour et al. (2018) montre une augmentation de la puissance thêta dans les régions préfrontales et frontales dans l'hémisphère droit lors de tâches où il s'agit de distinguer la perspective de soi et celle d'autrui. De plus, les régions fronto-pariétales permettent de faire la distinction entre soi et autrui (Ramsey et al., 2013). Selon Abu-Akel & Shamay-Tsoory (2011), la prise de perspective d'autrui impliquerait le cortex cingulaire antérieur qui se situe dans le lobe frontal,

qui engagerait lui aussi, au même titre que le lobe temporal, différents systèmes attentionnels afin de résoudre la tâche. Cela permet de faire le lien avec l'attention qui est significativement plus élevée dans le groupe « test » que dans le groupe « contre-mesure » au 5^{ème} jour d'immersion. L'orientation de l'attention au cours de la tâche de prise de perspective est déterminante puisqu'il s'agit de prendre en compte les éléments pertinents de l'environnement, dans ce cas l'avatar (Samson et al., 2010).

L'ensemble de ces résultats confortent la prise en compte de la perspective d'autrui prioritairement à la perspective de soi en condition d'immersion sèche pour les participants du groupe « test ». Un traitement plus profond de l'avatar serait engagé afin de se projeter directement dans la perspective de celui-ci. La contre-mesure permettrait de contrebalancer les effets de l'immersion sèche avec des résultats significativement différents entre le groupe « test » et le groupe « contre-mesure » qui montrent que la prise de perspective d'autrui dans le groupe « contre-mesure » n'est pas facilitée, probablement en raison d'un appui sur les indices corporels propres à soi, dans ce cas le participant devrait inhiber son propre ressenti corporel afin d'effectuer une représentation mentale incarnée d'autrui, ce qui serait cognitivement plus coûteux.

Concernant les limites de notre étude, nous rappelons que nous n'avons pas pu recruter de groupe contrôle afin de pouvoir comparer les performances du groupe « test » à celles d'un groupe non immergé pour évaluer les effets de l'immersion. Lors des cinq jours d'immersion, d'autres facteurs ont pu influencer les performances : le sommeil a été perturbé et peu réparateur chez la plupart des participants. Ces derniers rapportaient également des douleurs dans le dos et pour certains participants des sensations d'oppression. Il est à noter également que la tâche a été répétée à cinq reprises et qu'un effet de répétition de la tâche a pu être observé, notamment dans la tâche d'inhibition. Il n'est pas impossible que cet effet de répétition de la tâche ait influencé les résultats de façon générale. Le nombre restreint de participants ne permet pas de généraliser les résultats, ni d'atténuer les différences interindividuelles, notamment dans l'évaluation du style cognitif où la taille des groupes est relativement restreinte. Enfin, les résultats d'oculométrie sont limités en raison de la difficulté pour les participants à garder correctement positionnées dans le bain les lunettes qui permettent de recueillir les mouvements et les fixations oculaires.

DISCUSSION GÉNÉRALE

Priver un individu de la gravité peut être utilisé comme paradigme expérimental afin d'étudier les comportements liés à la prise de perspective d'autrui sans ce présupposé naturel (Pozzo et al., 1998). Les études en neurosciences cognitives permettent de comprendre comment l'individu réagit à des conditions environnementales spécifiques, telles qu'à l'impesanteur, en utilisant des mesures comportementales et physiologiques dans des environnements analogues sur Terre. Ces environnements participent à une meilleure compréhension du fonctionnement de l'individu en impesanteur tout en ayant moins de restrictions que si ces expérimentations devaient être réalisées dans l'ISS (nombre de participants, conditions d'accès, restrictions de matériel, etc.) (De la Torre, 2014). Ce travail de recherche s'est intéressé à la prise de perspective d'autrui en utilisant une tâche expérimentale complexe où un objet externe représentant un individu est présenté dans des orientations inhabituelles mais pour autant pouvant être rencontrées entre astronautes lors de vols spatiaux. Des modèles sur Terre recréent les effets physiologiques semblables à ceux rencontrés en impesanteur en perturbant principalement le système vestibulaire avec l'utilisation du modèle de vol parabolique et le système proprioceptif en utilisant le modèle d'immersion sèche. Dans ce travail de recherche, la première étude a évalué l'impact de la perturbation du système vestibulaire sur la prise de perspective d'autrui et la seconde étude a évalué l'efficacité d'une contre-mesure, les brassards de cuisse portés par un des deux groupes de participants, en immersion sèche.

Notre travail de recherche a montré que l'altération des informations sensorielles provenant des systèmes vestibulaires et proprioceptifs a entraîné une facilitation de la prise de perspective d'autrui au cours des conditions qui ont requis le recours à un cadre de référence égocentré. Ces modèles d'impesanteur simulée sur Terre provoqueraient une désafférentation, c'est-à-dire la perte de sensations corporelles perçues de façon totale ou partielle dans les membres inférieurs du corps en immersion sèche, voir dans des parties corporelles plus importantes en vol parabolique lors des phases de 0g avec une sensation de poids du corps perçu comme étant plus léger. Typiquement, les astronautes devraient s'appuyer davantage sur les repères visuels grâce à la polarité des objets dans le cadre environnemental (Oman, 2003), une référence sur laquelle les individus prennent facilement appui sur Terre afin de constituer une verticale visuelle subjective (I. Bonan et al., 2012). Cependant, d'après Howard & Hu (2001) au sein de vaisseaux spatiaux, le cadre visuel est relativement appauvri avec peu de signaux de polarité haut/bas et l'axe du corps constituerait ainsi un cadre de référence dominant car les astronautes perçoivent visuellement leurs pieds

dans un axe donné en fonction de leur position dans l'espace (Howard & Hu, 2001). Dans notre étude, nous avons choisi de masquer les indices visuels environnementaux en ayant recours au casque de réalité virtuelle, dans la première expérimentation, et à un tunnel optique, dans la seconde afin d'observer l'impact des perturbations sensorielles corporelles lors du recours à un cadre de référence égocentré pour effectuer la tâche.

En raison des arguments évoqués ci-dessus, nous proposons que la prise de perspective d'autrui soit facilitée en impesanteur en raison de la mise en œuvre d'une représentation mentale incarnée d'autrui (Iani, 2021). Celle-ci s'effectuerait de façon implicite en utilisant un traitement plus automatique que s'il s'agissait de distinguer sa propre perspective de celle d'autrui, ce qui permettrait une résolution plus rapide de la tâche (Qureshi et al., 2010; Samson et al., 2010). La représentation sensorimotrice de son propre corps étant perturbée en impesanteur simulée alors le traitement de la perspective d'autrui serait plus rapide sans nécessiter le recours à d'importantes ressources cognitives (Apperly & Butterfill, 2009). Cela diffère d'un traitement explicite qui serait plus exigeant sur le plan cognitif afin de distinguer la perspective de soi et celle d'autrui (Purcell et al., 2022). Le traitement automatique de la prise de perspective d'autrui permettrait une communication compétitive et stratégique idéale pour les équipages durant les missions spatiales de longue durée (Apperly & Butterfill, 2009). De plus, le traitement égocentré pourrait être facilité par le dispositif employé. En effet, aucun indice visuel environnemental n'a été fourni aux participants au cours de la tâche ce qui engage probablement davantage le participant à se projeter soi-même dans la perspective d'autrui.

Par ailleurs, l'utilisation d'une contre-mesure (brassards de cuisse) a permis de montrer des temps de réponses moins rapides dans l'exécution de la prise de perspective d'autrui tout en conservant des taux de réponses correctes similaires dans les deux expérimentations. En d'autres termes, la facilitation observée par les participants en immersion dans le groupe « test » n'a pas été observée dans le groupe « contre-mesure ». Selon Robin et al. (2020), les brassards de cuisse permettraient de limiter le déplacement des fluides corporels vers le haut du corps, de sorte que les sensations corporelles issues du système proprioceptif transmises au SNC seraient probablement moins impactées par l'immersion en raison d'une irrigation des fluides corporels répartis plus équitablement dans les membres. Néanmoins, nous ne pouvons pas affirmer que le fonctionnement cognitif des individus portant la contre-mesure est identique à celui sur Terre en gravité normale car nous n'avons pas pu comparer les performances des participants avec un groupe contrôle, hors de l'immersion.

Concernant les **limites de notre étude**, il est, d'une part, incontestable que les résultats sont difficilement généralisables car il s'agit d'expériences à court terme réalisées avec des dispositifs d'impesanteur simulée sur Terre. Cette reproduction partielle de l'impesanteur sur de courtes durées ne permet pas d'inclure un grand nombre de sujets. De plus, les différences interindividuelles peuvent être importantes, notamment les niveaux socio-culturels des participants mais aussi leurs capacités à faire face à des situations stressantes et inhabituelles. Strangman et al. (2014) montrent que des effets cognitifs individuels peuvent être induits par tout environnement nouveau. De plus, des sensations de douleur ou de température sur le corps peuvent également influencer la perception de l'environnement (Gallese & Sinigaglia, 2011). Les participants en immersion sèche ont relaté des douleurs physiques notamment au niveau du dos au cours des cinq jours d'immersion. De plus, les expériences ont été réalisées avec des sujets naïfs et inexpérimentés, à la différence des astronautes hautement entraînés et motivés pour être exposés au stress de la mission.

D'autre part, la tâche de prise de perspective est une tâche expérimentale qui n'a pas été testée au sein d'un échantillon « contrôle » de participants. Nous estimons que certaines conditions décrites dans cette tâche sont réalisées par le recours à un cadre de référence égocentré, or il est possible que certains participants utilisent préférentiellement un autre cadre de référence, notamment allocentré. En effet, l'avatar est incliné à 45° face au participant, ce qui pourrait être interprété comme un objet légèrement incliné, il s'agit en effet, d'une inclinaison « au-dessus de l'horizon » ne nécessitant pas d'importante rotation mentale par rapport à la verticale. Afin de considérer cette interrogation, il serait envisageable de compléter cette étude en proposant des inclinaisons plus larges de l'avatar, notamment avec des inclinaisons en dessous de l'horizon, autrement dit entre 120° et 240°. Il pourrait également s'agir d'un dispositif plus immersif avec une scène en 3D qui serait construite au plus proche de l'intérieur de l'ISS afin de créer un environnement plus réaliste favorisant un sentiment de présence plus important pour le participant.

L'utilisation de contre-mesures est primordiale au bon déroulement d'une mission puisqu'elles permettent d'atténuer les effets physiologiques néfastes de l'impesanteur. Afin de préserver cette facilitation à la prise de perspective d'autrui, il conviendrait d'entraîner les astronautes à se focaliser sur la perspective de l'autre. Des dispositifs de réalité virtuelle ont été suggérés récemment comme un modèle de contre-mesure, dans le contexte du « mal de l'espace » notamment. L'instabilité de la verticale subjective est considérée comme un déclencheur spécifique du mal de l'espace (« *space motion sickness* »). Il s'agit de proposer aux astronautes en amont du vol spatial, une exposition répétée à un environnement de stimulation avec une scène visuelle rotative afin de provoquer les effets de « mal des transports ». L'astronaute se situe dans une position couchée horizontale afin de créer un contexte

sensoriel où tout le poids du corps est réparti uniformément sur la surface. Ces auteurs ont montré que les sujets entraînés étaient moins sensibles au mal de l'espace avec des symptômes réduits de 40% (Chen et al., 2017). De plus, les sujets ayant été entraînés à une rotation de l'environnement seraient susceptibles de s'appuyer de façon moindre sur les repères visuels présents dans l'environnement mais davantage sur leurs sensations corporelles. Chen et al. (2017) suggèrent que les informations visuelles peuvent être inefficaces et peu fiables pour l'orientation et la stabilisation du corps dans une scène visuelle inhabituelle. De plus, Allen et al. (1996) proposent que des tâches de prise de perspective en laboratoire seraient un bon indicateur des capacités spatiales à petite échelle mais faciliteraient également l'apprentissage de ces habiletés dans un environnement réel. Ainsi, à l'issue de ce travail de recherche, nous pouvons suggérer qu'un entraînement en réalité virtuelle à des scènes visuelles rotatives inciterait probablement les astronautes à considérer préférentiellement la mise en œuvre d'un cadre de référence égocentré lorsqu'il s'agit de se projeter mentalement pour percevoir un objet externe d'un autre point de vue. Dans l'ISS, cet entraînement préalable permettrait aux astronautes de pouvoir se projeter plus rapidement à la place d'un collègue afin de réagir plus rapidement en comprenant la procédure à réaliser d'un autre point de vue.

CONCLUSION

L'un des objectifs à long terme, fixé dans le domaine astronautique depuis des décennies et envisagé pour les années 2030 est la réalisation d'une mission spatiale habitée vers la planète Mars. Cependant, un vol spatial habité vers Mars s'avère être un défi technique mais également humain. Ce voyage demandera un délai d'environ 258 jours où l'équipage se trouvera confiné dans un espace restreint. Ce contexte, particulièrement extrême, peut entraîner des problèmes psychologiques mais également des difficultés sur le plan physiologique découlant de l'absence de gravité sur des périodes prolongées. Notre travail de recherche montre qu'il est important de considérer les aptitudes de cognition sociale et de prendre en compte l'impact de la modification des entrées sensorielles en impesanteur. L'utilisation d'un cadre de référence égocentré serait à privilégier lorsqu'il s'agit de communiquer avec autrui. Il convient ainsi de pouvoir proposer aux astronautes des techniques pour améliorer la communication interpersonnelle et de pouvoir collaborer efficacement sans compromettre la sécurité de la mission. Une personnalisation des contre-mesures serait une possibilité envisageable afin de former efficacement et de façon appropriée les astronautes à prendre davantage appui sur une représentation incarnée plutôt que sur les indices visuels de l'environnement, tout en considérant leurs différences interindividuelles telles que le style cognitif.

BIBLIOGRAPHIE

- Abu-Akel, A., & Shamay-Tsoory, S. (2011). Neuroanatomical and neurochemical bases of theory of mind. *Neuropsychologia*, 49(11), 2971-2984. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.07.012>
- Acket, B., Amirova, L., Gerdelat, A., Cintas, P., Custaud, M.-A., & Pavy-LeTraon, A. (2018). Dry immersion as a model of deafferentation : A neurophysiology study using somatosensory evoked potentials. *PloS One*, 13(8), e0201704. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201704>
- Allen, G. L., Kirasic, K. C., Dobson, S. H., Long, R. G., & Beck, S. (1996). Predicting environmental learning from spatial abilities : An indirect route. *Intelligence*, 22(3), 327-355. [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(96\)90026-4](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(96)90026-4)
- Amado, I., Brénugat-Herné, L., Orriols, E., Desombre, C., Dos Santos, M., Prost, Z., Krebs, M.-O., & Piolino, P. (2016). A Serious Game to Improve Cognitive Functions in Schizophrenia : A Pilot Study. *Frontiers in Psychiatry*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2016.00064>
- Amorim, M.-A., Isableu, B., & Jarraya, M. (2006). Embodied spatial transformations : “Body Analogy” for the mental rotation of objects. *Journal of experimental psychology. General*, 135, 327-347. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.135.3.327>
- Apperly, I. A. (2012). What is “theory of mind”? Concepts, cognitive processes and individual differences. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(5), 825-839. <https://doi.org/10.1080/17470218.2012.676055>
- Apperly, I. A., & Butterfill, S. A. (2009). Do humans have two systems to track beliefs and belief-like states? *Psychological Review*, 116(4), 953-970. <https://doi.org/10.1037/a0016923>
- Arbeille, P., Greaves, D., Guillon, L., & Besnard, S. (2020). Thigh Cuff Effects on Venous Flow Redistribution During 4 Days in Dry Immersion. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 91(9), 697-702. <https://doi.org/10.3357/AMHP.5524.2020>
- Arbeille, P., Herault, S., Fomina, G., Roumy, J., Alferova, I., & Gharib, C. (1999). Influences of thigh cuffs on the cardiovascular system during 7-day head-down bed rest. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 87(6), 2168-2176. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.6.2168>
- Arzy, S., Thut, G., Mohr, C., Michel, C. M., & Blanke, O. (2006). Neural basis of embodiment : Distinct contributions of temporoparietal junction and extrastriate body area. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 26(31), 8074-8081. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0745-06.2006>
- Asch, S. E., & Witkin, H. A. (1948). Studies in space orientation. II. Perception of the upright with displaced visual fields and with body tilted. *Journal of Experimental Psychology*, 38(4), 455-477. <https://doi.org/10.1037/h0054121>
- Baddeley, A. (2003). Working memory : Looking back and looking forward. *Nature Reviews. Neuroscience*, 4(10), 829-839. <https://doi.org/10.1038/nm1201>
- Bagust, J., Docherty, S., Haynes, W., Telford, R., & Isableu, B. (2013a). Changes in Rod and Frame Test Scores Recorded in Schoolchildren during Development – A Longitudinal Study. *PLoS ONE*, 8(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065321>
- Bagust, J., Docherty, S., Haynes, W., Telford, R., & Isableu, B. (2013b). Changes in Rod and Frame Test Scores Recorded in Schoolchildren during Development – A Longitudinal Study. *PLoS ONE*, 8(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065321>
- Bailliar, O., Capderou, A., Cholley, B. P., Kays, C., Rivière, D., Téhoueyres, P., Lachaud, J. L., & Vaïda, P. (1998). Changes in lower limb volume in humans during parabolic flight. *Journal*

of *Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985), 85(6), 2100-2105. <https://doi.org/10.1152/jappl.1998.85.6.2100>

Baker, L. J., Levin, D. T., & Saylor, M. M. (2016). The extent of default visual perspective taking in complex layouts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(4), 508-516. <https://doi.org/10.1037/xhp0000164>

Ball, L. J., Phillips, P., Wade, C. N., & Quayle, J. D. (2006). Effects of belief and logic on syllogistic reasoning : Eye-movement evidence for selective processing models. *Experimental Psychology*, 53(1), 77-86. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.53.1.77>

Baron-Cohen, S., & Wheelwright, S. (2004). The empathy quotient : An investigation of adults with Asperger syndrome or high functioning autism, and normal sex differences. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 34(2), 163-175.

Berthoz, A. (1991). Reference frames for the perception and control of movement. In *Brain and space* (p. 81-111). Oxford University Press.

Berthoz, A. (1997). *Sens du mouvement (Le)*. Odile Jacob.

Berthoz, A. (2010). Physiologie de la perception et de l'action. *L'annuaire du Collège de France. Cours et travaux*, 109, Article 109. <https://doi.org/10.4000/annuaire-cdf.358>

Berthoz, S., Wessa, M., Kedia, G., Wicker, B., & Grèzes, J. (2008). Cross-Cultural Validation of the Empathy Quotient in a French-Speaking Sample. *The Canadian Journal of Psychiatry*, 53(7), 469-477. <https://doi.org/10.1177/070674370805300712>

Bertoux, M. (2016). Cognition sociale. */data/traites/ne/17-65655/*. <https://www.em-consulte.com/en/article/1055941>

Bestaven, E., Kambrun, C., Guehl, D., Cazalets, J.-R., & Guillaud, E. (2016). The influence of scopolamine on motor control and attentional processes. *PeerJ*, 4, e2008. <https://doi.org/10.7717/peerj.2008>

Bloomberg, J. J., Peters, B. T., Cohen, H. S., & Mulavara, A. P. (2015). Enhancing astronaut performance using sensorimotor adaptability training. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9, 129. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00129>

Bock, O., Weigelt, C., & Bloomberg, J. J. (2010). Cognitive demand of human sensorimotor performance during an extended space mission : A dual-task study. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 81(9), 819-824. <https://doi.org/10.3357/ase.2608.2010>

Böffel, C., & Müsseler, J. (2019). Visual perspective taking for avatars in a Simon task. *Attention, Perception & Psychophysics*, 81(1), 158-172. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-1573-0>

Bonan, I., Damphousse, M., Leblong, E., & Rauscent, H. (2012). Intérêts et limites des mesures de verticalité subjective pour l'évaluation des troubles de l'équilibre. *La Lettre de médecine physique et de réadaptation*, 28(3), 145-152. <https://doi.org/10.1007/s11659-012-0299-y>

Bonan, I. V., Leman, M. C., Legargasson, J. F., Guichard, J. P., & Yelnik, A. P. (2006). Evolution of subjective visual vertical perturbation after stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 20(4), 484-491. <https://doi.org/10.1177/1545968306289295>

Brandt, T., Schautzer, F., Hamilton, D. A., Brüning, R., Markowitsch, H. J., Kalla, R., Darlington, C., Smith, P., & Strupp, M. (2005). Vestibular loss causes hippocampal atrophy and impaired spatial memory in humans. *Brain: A Journal of Neurology*, 128(Pt 11), 2732-2741. <https://doi.org/10.1093/brain/awh617>

Brickenkamp, R., Schmidt-Atzert, L., & Liepmann, D. (2015). *d2-R: Test d'attention concentrée-révisé : manuel*. Hogrefe.

Bull, R., Phillips, L. H., & Conway, C. A. (2008). The role of control functions in mentalizing :

- Dual-task studies of theory of mind and executive function. *Cognition*, 107(2), 663-672. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.07.015>
- Cane, J. E., Ferguson, H. J., & Apperly, I. A. (2017). Using perspective to resolve reference : The impact of cognitive load and motivation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 43(4), Article 4. <https://doi.org/10.1037/xlm0000345>
- Carpenter, P. A., Just, M. A., Keller, T. A., Eddy, W., & Thulborn, K. (1999). Graded functional activation in the visuospatial system with the amount of task demand. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(1), 9-24. <https://doi.org/10.1162/089892999563210>
- Carriot, J., Jamali, M., & Cullen, K. E. (2015). Rapid adaptation of multisensory integration in vestibular pathways. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00059>
- Cassady, K., Koppelmans, V., Reuter-Lorenz, P., De Dios, Y., Gadd, N., Wood, S., Castenada, R. R., Kofman, I., Bloomberg, J., Mulavara, A., & Seidler, R. (2016). Effects of a spaceflight analog environment on brain connectivity and behavior. *NeuroImage*, 141, 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.07.029>
- Cavallo, A., Ansuini, C., Capozzi, F., Tversky, B., & Becchio, C. (2017). When far becomes near : Perspective taking induces social remapping of spatial relations. *Psychological Science*, 28(1), 69-79. <https://doi.org/10.1177/0956797616672464>
- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX. *EPIQUE 2009: 5ème Colloque de Psychologie Ergonomique*, 233-239.
- Chabeauti, P. (2012). *Adaptation des représentations internes de l'action à la microgravité : Continuum fonctionnel de la perception à l'exécution* [These de doctorat, Aix-Marseille]. <https://www.theses.fr/2012AIXM4730>
- Chen, W., Chao, J.-G., Zhang, Y., Wang, J.-K., Chen, X.-W., & Tan, C. (2017). Orientation Preferences and Motion Sickness Induced in a Virtual Reality Environment. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 88(10), 903-910. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4817.2017>
- Cheung, B. S., Howard, I. P., & Money, K. E. (1990). Visually-induced tilt during parabolic flights. *Experimental Brain Research*, 81(2), 391-397. <https://doi.org/10.1007/BF00228131>
- Chung, J., & Monroe, G. S. (2003). Exploring Social Desirability Bias. *Journal of Business Ethics*, 44(4), 291-302. <https://doi.org/10.1023/A:1023648703356>
- Clément, G., Andre-Deshays, C., & Lathan, C. E. (1989). Effects of gravito-inertial force variations on vertical gaze direction during oculomotor reflexes and visual fixation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 60(12), 1194-1198.
- Clément, G., Lathan, C., Lockerd, A., & Bukley, A. (2009). Mental representation of spatial cues in microgravity: Writing and drawing tests. *Acta Astronautica*, 64(7), 678-681. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.01.001>
- Clément, G., Moore, S. T., Raphan, T., & Cohen, B. (2001). Perception of tilt (somatogravic illusion) in response to sustained linear acceleration during space flight. *Experimental Brain Research*, 138(4), 410-418. <https://doi.org/10.1007/s002210100706>
- Cohen, Y. E., & Andersen, R. A. (2002). A common reference frame for movement plans in the posterior parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/nrn873>
- Collado, A., Langlet, C., Tzanova, T., Hainaut, J.-P., Monfort, V., & Bolmont, B. (2017). Affective states and adaptation to parabolic flights. *Acta Astronautica*, 134, 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.01.043>
- Colombo, D., Serino, S., Tuena, C., Pedroli, E., Dakanalis, A., Cipresso, P., & Riva, G. (2017).

Egocentric and allocentric spatial reference frames in aging: A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 80, 605-621. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.07.012>

Connors, M. M., Harrison, A. A., & Akins, F. R. (1986). Psychology and the resurgent space program. *American Psychologist*, 41(8), 906-913. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.41.8.906>

Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1973). CHRONOMETRIC STUDIES OF THE ROTATION OF MENTAL IMAGES. In W. G. Chase (Éd.), *Visual Information Processing* (p. 75-176). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-170150-5.50009-3>

Coupé, M., Tomilovskaya, E., Françoise Larcher, Diquet, B., Pastushkova, L. K., Kozlovskaya, I. B., Larina, I. M., Gauquelin-Koch, G., Kulchitsky, V. A., Custaud, M.-A., & Navasiolava, N. M. (2013). *Body Fluid Changes, Cardiovascular Deconditioning and Metabolic Impairment Are Reversed 24 Hours after a 5-Day Dry Immersion*. 2013. <https://doi.org/10.4236/ojneph.2013.31004>

Dalecki, M., Dern, S., & Steinberg, F. (2013). Mental rotation of a letter, hand and complex scene in microgravity. *Neuroscience Letters*, 533, 55-59. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.11.002>

Dans, P. W., Foglia, S. D., & Nelson, A. J. (2021). Data Processing in Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) Motor Control Research. *Brain Sciences*, 11(5), 606. <https://doi.org/10.3390/brainsci11050606>

De Abreu, S., Amirova, L., Murphy, R., Wallace, R., Twomey, L., Gauquelin-Koch, G., Raverot, V., Larcher, F., Custaud, M.-A., & Navasiolava, N. (2017). Multi-System Deconditioning in 3-Day Dry Immersion without Daily Raise. *Frontiers in Physiology*, 8, 799. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00799>

De la Torre, G. G. (2014). Cognitive Neuroscience in Space. *Life : Open Access Journal*, 4(3), 281-294. <https://doi.org/10.3390/life4030281>

Decety, J., & Jackson, P. L. (2006). A Social-Neuroscience Perspective on Empathy. *Current Directions in Psychological Science*, 15(2), 54-58. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2006.00406.x>

Demangel, R., Treffel, L., Py, G., Brioché, T., Pagano, A. F., Bareille, M.-P., Beck, A., Pessemeuse, L., Candau, R., Gharib, C., Chopard, A., & Millet, C. (2017). Early structural and functional signature of 3-day human skeletal muscle disuse using the dry immersion model. *The Journal of Physiology*, 595(13), 4301-4315. <https://doi.org/10.1113/JP273895>

Demertzi, A., Van Ombergen, A., Tomilovskaya, E., Jeurissen, B., Pechenkova, E., Di Perri, C., Litvinova, L., Amico, E., Rumshiskaya, A., Rukavishnikov, I., Sijbers, J., Sinitsyn, V., Kozlovskaya, I. B., Sunaert, S., Parizel, P. M., Van de Heyning, P. H., Laureys, S., & Wuyts, F. L. (2016). Cortical reorganization in an astronaut's brain after long-duration spaceflight. *Brain Structure & Function*, 221(5), 2873-2876. <https://doi.org/10.1007/s00429-015-1054-3>

Denis, M. (2016). Référentiels. In *Petit traité de l'espace* (p. 85-104). Mardaga. <https://www.cairn.info/petit-traite-de-l-espace--9782804703226-p-85.htm>

Deroualle, D., & Lopez, C. (2014). Toward a vestibular contribution to social cognition. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8, 16. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00016>

de Winter, J. C. F. (2014). Controversy in human factors constructs and the explosive use of the NASA-TLX: A measurement perspective. *Cognition, Technology & Work*, 16(3), 289-297. <https://doi.org/10.1007/s10111-014-0275-1>

Domic-Siede, M., Irani, M., Valdés, J., Perrone-Bertolotti, M., & Ossandón, T. (2021). Theta activity from frontopolar cortex, mid-cingulate cortex and anterior cingulate cortex shows different roles in cognitive planning performance. *NeuroImage*, 226, 117557. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117557>

- Dumontheil, I., Küster, O., Apperly, I. A., & Blakemore, S.-J. (2010). Taking perspective into account in a communicative task. *NeuroImage*, *52*(4), 1574-1583. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.05.056>
- Dyde, R. T., Jenkin, M. R., Jenkin, H. L., Zacher, J. E., & Harris, L. R. (2009). The effect of altered gravity states on the perception of orientation. *Experimental Brain Research*, *194*(4), 647-660. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1741-5>
- Ehrsson, H. H., Spence, C., & Passingham, R. E. (2004). That's my hand! Activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb. *Science (New York, N.Y.)*, *305*(5685), 875-877. <https://doi.org/10.1126/science.1097011>
- Ferguson, H. J., Apperly, I., & Cane, J. E. (2017). Eye tracking reveals the cost of switching between self and other perspectives in a visual perspective-taking task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *70*(8), 1646-1660. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1199716>
- Ferrè, E. R., Frett, T., Haggard, P., & Longo, M. R. (2019). A gravitational contribution to perceived body weight. *Scientific Reports*, *9*, 11448. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47663-x>
- Foley, R. T., Whitwell, R. L., & Goodale, M. A. (2015). The two-visual-systems hypothesis and the perspectival features of visual experience. *Consciousness and Cognition*, *35*, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.03.005>
- Fovet, T., Guilhot, C., Stevens, L., Montel, V., Delobel, P., Roumanille, R., Semporé, M.-Y., Freyssenet, D., Py, G., Brioché, T., & Chopard, A. (2021). Early Deconditioning of Human Skeletal Muscles and the Effects of a Thigh Cuff Countermeasure. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(21), 12064. <https://doi.org/10.3390/ijms222112064>
- Friedl-Werner, A., Machado, M.-L., Balestra, C., Liegard, Y., Philoxene, B., Brauns, K., Stahn, A. C., Hitier, M., & Besnard, S. (2021). Impaired Attentional Processing During Parabolic Flight. *Frontiers in Physiology*, *12*, 675426. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.675426>
- Frith, C. D., & Frith, U. (2012). Mechanisms of social cognition. *Annual Review of Psychology*, *63*, 287-313. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100449>
- Fuentes, C. T., Pazzaglia, M., Longo, M. R., Scivoletto, G., & Haggard, P. (2013). Body image distortions following spinal cord injury. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *84*(2), 201-207. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2012-304001>
- Gallagher, S., & Cole, J. (1995). Body Image and Body Schema in a Deafferented Subject. *The Journal of Mind and Behavior*, *16*(4), 369-389.
- Gallese, V., & Sinigaglia, C. (2011). What is so special about embodied simulation? *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(11), 512-519. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.09.003>
- Gardner, M. R., Stent, C., Mohr, C., & Golding, J. F. (2017). Embodied perspective-taking indicated by selective disruption from aberrant self motion. *Psychological Research*, *81*(2), 480-489. <https://doi.org/10.1007/s00426-016-0755-4>
- Gerasimova-Meigal, L., Meigal, A., Sireneva, N., & Saenko, I. (2021). Autonomic Function in Parkinson's Disease Subjects Across Repeated Short-Term Dry Immersion: Evidence From Linear and Non-linear HRV Parameters. *Frontiers in Physiology*, *12*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2021.712365>
- Gibson, J. J. (1952). The relation between visual and postural determinants of the phenomenal vertical. *Psychological Review*, *59*(5), 370-375. <https://doi.org/10.1037/h0057965>
- Giummarra, M. J., Gibson, S. J., Georgiou-Karistianis, N., & Bradshaw, J. L. (2008). Mechanisms underlying embodiment, disembodiment and loss of embodiment. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *32*(1), 143-160. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2007.07.001>
- Glöckner, A., & Herbold, A.-K. (2010). An eye-tracking study on information processing in risky

- decisions : Evidence for compensatory strategies based on automatic processes. *Journal of Behavioral Decision Making*, 1(24), 71-98. <https://doi.org/10.1002/bdm.684>
- Gopalakrishnan, R., Genc, K. O., Rice, A. J., Lee, S. M. C., Evans, H. J., Maender, C. C., Ilaslan, H., & Cavanagh, P. R. (2010). Muscle volume, strength, endurance, and exercise loads during 6-month missions in space. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 81(2), 91-102. <https://doi.org/10.3357/asm.2583.2010>
- Grabherr, L., Karmali, F., Bach, S., Indermaur, K., Metzler, S., & Mast, F. W. (2007). Mental own-body and body-part transformations in microgravity. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 17(5-6), 279-287.
- Habacha, H., Lejeune-Poutrain, L., & Molinaro, C. (2017). Realistic Stimuli Reveal Selective Effects of Motor Expertise During a Mental Body Rotation Task. *The American Journal of Psychology*, 130(1), 47-62. <https://doi.org/10.5406/amerjpsyc.130.1.0047>
- Habacha, H., Moreau, D., Jarraya, M., Lejeune-Poutrain, L., & Molinaro, C. (2018). Dissociating object-based from egocentric transformations in mental body rotation : Effect of stimuli size. *Experimental Brain Research*, 236(1), 275-284. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5125-y>
- Harris, L. R., Jenkin, M., & Herpers, R. (2022). Long-duration head down bed rest as an analog of microgravity : Effects on the static perception of upright. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 32(4), 325-340. <https://doi.org/10.3233/VES-210016>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of empirical and theoretical research. In *Human mental workload* (p. 139-183). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Herrera, F., Bailenson, J., Weisz, E., Ogle, E., & Zaki, J. (2018). Building long-term empathy : A large-scale comparison of traditional and virtual reality perspective-taking. *PLoS ONE*, 13(10), e0204494. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204494>
- Higashiyama, A., & Koga, K. (1998). Apparent body tilt and postural aftereffect. *Perception & Psychophysics*, 60(2), 331-347. <https://doi.org/10.3758/BF03206041>
- Hirai, M., Muramatsu, Y., & Nakamura, M. (2020). Role of the Embodied Cognition Process in Perspective-Taking Ability During Childhood. *Child Development*, 91(1), 214-235. <https://doi.org/10.1111/cdev.13172>
- Hocke, L. M., Oni, I. K., Duszynski, C. C., Corrigan, A. V., Frederick, B. deB., & Dunn, J. F. (2018). Automated Processing of fNIRS Data—A Visual Guide to the Pitfalls and Consequences. *Algorithms*, 11(5), 67. <https://doi.org/10.3390/a11050067>
- Howard, I. P., & Hu, G. (2001). Visually induced reorientation illusions. *Perception*, 30(5), 583-600. <https://doi.org/10.1068/p3106>
- Iachini, T., Ruggiero, G., Conson, M., & Trojano, L. (2009). Lateralization of egocentric and allocentric spatial processing after parietal brain lesions. *Brain and Cognition*, 69(3), 514-520. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.11.001>
- Iani, F. (2021). Embodied cognition : So flexible as to be “disembodied”? *Consciousness and Cognition*, 88, 103075. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2021.103075>
- Indovina, I., Maffei, V., Bosco, G., Zago, M., Macaluso, E., & Lacquaniti, F. (2005). Representation of visual gravitational motion in the human vestibular cortex. *Science (New York, N.Y.)*, 308(5720), 416-419. <https://doi.org/10.1126/science.1107961>
- Isableu, B., Gueguen, M., Fourré, B., Giraudet, G., & Amorim, M.-A. (2008). Assessment of visual field dependence : Comparison between the mechanical 3D rod-and-frame test developed by Oltman in 1968 with a 2D computer-based version. *Journal of vestibular research : equilibrium & orientation*, 18, 239-247.

- Isableu, B., Ohlmann, T., Crémieux, J., & Amblard, B. (2003). Differential approach to strategies of segmental stabilisation in postural control. *Experimental Brain Research*, 150(2), 208-221. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1446-0>
- Iwase, S., Nishimura, N., Tanaka, K., Mano, T., Iwase, S., Nishimura, N., Tanaka, K., & Mano, T. (2020). Effects of Microgravity on Human Physiology. In *Beyond LEO - Human Health Issues for Deep Space Exploration*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90700>
- Jolliffe, D., & Farrington, D. P. (2006). Development and validation of the Basic Empathy Scale. *Journal of Adolescence*, 29(4), 589-611. <https://doi.org/10.1016/j.adolescence.2005.08.010>
- Kammers, M. P. M., van der Ham, I. J. M., & Dijkerman, H. C. (2006). Dissociating body representations in healthy individuals: Differential effects of a kinaesthetic illusion on perception and action. *Neuropsychologia*, 44(12), 2430-2436. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.04.009>
- Kaski, D., Quadir, S., Nigmatullina, Y., Malhotra, P. A., Bronstein, A. M., & Seemungal, B. M. (2016). Temporoparietal encoding of space and time during vestibular-guided orientation. *Brain: A Journal of Neurology*, 139(Pt 2), 392-403. <https://doi.org/10.1093/brain/awv370>
- Keehner, M., Guerin, S. A., Miller, M. B., Turk, D. J., & Hegarty, M. (2006). Modulation of neural activity by angle of rotation during imagined spatial transformations. *NeuroImage*, 33(1), 391-398. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.06.043>
- Keysar, B., Barr, D. J., Balin, J. A., & Brauner, J. S. (2000). Taking Perspective in Conversation: The Role of Mutual Knowledge in Comprehension. *Psychological Science*, 11(1), 32-38. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00211>
- Keysar, B., Lin, S., & Barr, D. J. (2003). Limits on theory of mind use in adults. *Cognition*, 89(1), 25-41. [https://doi.org/10.1016/s0010-0277\(03\)00064-7](https://doi.org/10.1016/s0010-0277(03)00064-7)
- Kheradmand, A., Lasker, A., & Zee, D. S. (2015). Transcranial magnetic stimulation (TMS) of the supramarginal gyrus: A window to perception of upright. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 25(3), 765-771. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht267>
- Kilteni, K., Groten, R., & Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence Teleoperators & Virtual Environments*, 21. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124
- Kirenskaya, A. V., Tomilovskaya, E. S., Novototskii-Vlasov, V. Yu., & Kozlovskaya, I. B. (2006). The effects of simulated microgravity on characteristics of slow presaccadic potentials. *Human Physiology*, 32(2), 131-139. <https://doi.org/10.1134/S0362119706020022>
- Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and Egocentric Spatial Representations: Definitions, Distinctions, and Interconnections. In C. Freksa, C. Habel, & K. F. Wender (Éds.), *Spatial Cognition: An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge* (p. 1-17). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-69342-4_1
- Klein, F., & Kranczioch, C. (2019). Signal Processing in fNIRS: A Case for the Removal of Systemic Activity for Single Trial Data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2019.00331>
- Koppelmans, V., Bloomberg, J. J., De Dios, Y. E., Wood, S. J., Reuter-Lorenz, P. A., Kofman, I. S., Riascos, R., Mulavara, A. P., & Seidler, R. D. (2017). Brain plasticity and sensorimotor deterioration as a function of 70 days head down tilt bed rest. *PLoS One*, 12(8), e0182236. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182236>
- Koppelmans, V., Bloomberg, J. J., Mulavara, A. P., & Seidler, R. D. (2016). Brain structural plasticity with spaceflight. *Npj Microgravity*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41526-016-0001-9>
- Kozhevnikov, M., & Hegarty, M. (2001). A dissociation between object manipulation spatial ability and spatial orientation ability. *Memory & Cognition*, 29(5), 745-756. <https://doi.org/10.3758/BF03200477>

- Kozlovskaya, I. B. (2008). [Fundamental and applied objectives of investigations in immersion]. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina = Aerospace and Environmental Medicine*, 42(5), 3-7.
- Kozlovskaya, I. B., Grigoriev, A. I., & Stepantsov, V. I. (1995). Countermeasure of the negative effects of weightlessness on physical systems in long-term space flights. *Acta Astronautica*, 36(8-12), 661-668. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(95\)00156-5](https://doi.org/10.1016/0094-5765(95)00156-5)
- Kozlovskaya, I. B., Sayenko, I. V., Sayenko, D. G., Miller, T. F., Khusnutdinova, D. R., & Melnik, K. A. (2007). Role of support afferentation in control of the tonic muscle activity. *Acta Astronautica*, 60(4), 285-294. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2006.08.010>
- Lackner, J. R. (1992). Spatial orientation in weightless environments. *Perception*, 21(6), 803-812. <https://doi.org/10.1068/p210803>
- Laroche, H. (1996). Karl E. Weick (1995), Sensemaking in Organizations, Sage, Thousand Oaks, Californie. *Sociologie du travail*, 38(2), 225-232. <https://doi.org/10.3406/sotra.1996.2274>
- Lazarev, I. (2021). Event-related potentials accompanying performance of computer mouse pointing task in the long-term dry immersion model of microgravity. *Acta Astronautica*, 181, 461-467. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.040>
- Lazarev, I. E., Tomilovskaya, E. S., & Kozlovskaya, I. B. (2018). Resting State Brain Activity During Long-Term Dry Immersion. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 89(7), 642-647. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4972.2018>
- LeBlanc, A. D., Spector, E. R., Evans, H. J., & Sibonga, J. D. (2007). Skeletal responses to space flight and the bed rest analog: A review. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 7(1), 33-47.
- Leech, R., & Sharp, D. J. (2014). The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease. *Brain: A Journal of Neurology*, 137(Pt 1), 12-32. <https://doi.org/10.1093/brain/awt162>
- Levine, A. S. (1991). Psychological Effects of Long-Duration Space Missions and Stress Amelioration Techniques. In A. A. Harrison, Y. A. Clearwater, & C. P. McKay (Éds.), *From Antarctica to Outer Space* (p. 305-315). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3012-0_29
- Li, K., Guo, X., Jin, Z., Ouyang, X., Zeng, Y., Feng, J., Wang, Y., Yao, L., & Ma, L. (2015). Effect of Simulated Microgravity on Human Brain Gray Matter and White Matter – Evidence from MRI. *PLOS ONE*, 10(8), e0135835. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135835>
- Lin, S., Keysar, B., & Epley, N. (2010). Reflexively mindblind: Using theory of mind to interpret behavior requires effortful attention. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46(3), 551-556. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2009.12.019>
- Lindgren, K. N., Kraft, D., Ballard, R. E., Tucker, A., & Hargens, A. R. (1998). Venoconstrictive thigh cuffs impede fluid shifts during simulated microgravity. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 69(11), 1052-1058.
- Loon, A. van, Bailenson, J., Zaki, J., Bostick, J., & Willer, R. (2018). Virtual reality perspective-taking increases cognitive empathy for specific others. *PLOS ONE*, 13(8), e0202442. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202442>
- Lopez, C., Bachofner, C., Mercier, M., & Blanke, O. (2009). Gravity and observer's body orientation influence the visual perception of human body postures. *Journal of Vision*, 9(5), 1.1-14. <https://doi.org/10.1167/9.5.1>
- Lopez, C., Halje, P., & Blanke, O. (2008). Body ownership and embodiment: Vestibular and multisensory mechanisms. *Neurophysiologie Clinique = Clinical Neurophysiology*, 38(3), 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2007.12.006>

- Lopez, C., Lacour, M., Ahmadi, A. E., Magnan, J., & Borel, L. (2007). Changes of visual vertical perception : A long-term sign of unilateral and bilateral vestibular loss. *Neuropsychologia*, 45(9), 2025-2037. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.02.004>
- Lowndes, B. R., Forsyth, K. L., Blocker, R. C., Dean, P. G., Truty, M. J., Heller, S. F., Blackmon, S., Hallbeck, M. S., & Nelson, H. (2020). NASA-TLX Assessment of Surgeon Workload Variation Across Specialties. *Annals of Surgery*, 271(4), 686-692. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000003058>
- Luyat, M. (1997). Verticale subjective versus verticale posturale : Une note sur l'étude de la perception de la verticale. *L'Année psychologique*, 97(3), 433-447. <https://doi.org/10.3406/psy.1997.28969>
- Macaulay, T., Macias, B., Lee, S., Boda, W., Watenpaugh, D., & Hargens, A. (2016). Treadmill exercise within lower-body negative pressure attenuates simulated spaceflight-induced reductions of balance abilities in men but not women. *npj Microgravity*, 2, 16022. <https://doi.org/10.1038/npjmgrav.2016.22>
- MacNeilage, P. R., Banks, M. S., Berger, D. R., & Bühlhoff, H. H. (2007). A Bayesian model of the disambiguation of gravito-inertial force by visual cues. *Experimental Brain Research*, 179(2), 263-290. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0792-0>
- MacNeilage, P. R., Turner, A. H., & Angelaki, D. E. (2010). Canal-otolith interactions and detection thresholds of linear and angular components during curved-path self-motion. *Journal of Neurophysiology*, 104(2), 765-773. <https://doi.org/10.1152/jn.01067.2009>
- Mado, M., Herrera, F., Nowak, K., & Bailenson, J. (2021). Effect of Virtual Reality Perspective-Taking on Related and Unrelated Contexts. *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking*, 24(12), 839-845. <https://doi.org/10.1089/cyber.2020.0802>
- Martin, A. K., Huang, J., Hunold, A., & Meinzer, M. (2019). Dissociable Roles Within the Social Brain for Self-Other Processing : A HD-tDCS Study. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 29(8), 3642-3654. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy238>
- Martin, A. K., Kessler, K., Cooke, S., Huang, J., & Meinzer, M. (2020). The Right Temporoparietal Junction Is Causally Associated with Embodied Perspective-taking. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 40(15), 3089-3095. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2637-19.2020>
- Martolini, C., Cappagli, G., Luparia, A., Signorini, S., & Gori, M. (2020). The Impact of Vision Loss on Allocentric Spatial Coding. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 565. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00565>
- Matar Touma, V. (2021). La maturité de la perception et les facteurs en jeu à travers le dessin de la personne. *Bulletin de psychologie*, Numéro 572(2), 137-153. <https://doi.org/10.3917/bupsy.572.0137>
- Mattan, B., Quinn, K. A., Apperly, I. A., Sui, J., & Rotshtein, P. (2015). Is it always me first? Effects of self-tagging on third-person perspective-taking. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(4), 1100-1117. <https://doi.org/10.1037/xlm0000078>
- May, M. (2004). Imaginal perspective switches in remembered environments : Transformation versus interference accounts. *Cognitive Psychology*, 48(2), 163-206. [https://doi.org/10.1016/S0010-0285\(03\)00127-0](https://doi.org/10.1016/S0010-0285(03)00127-0)
- McKinnon, M. C., & Moscovitch, M. (2007). Domain-general contributions to social reasoning : Theory of mind and deontic reasoning re-explored. *Cognition*, 102(2), 179-218. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.12.011>
- Meigal, A. Yu., Tretjakova, O. G., Gerasimova-Meigal, L. I., & Sayenko, I. V. (2021). Program of Seven 45-min Dry Immersion Sessions Improves Choice Reaction Time in Parkinson's Disease. *Frontiers in Physiology*, 11.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2020.621198>

Mekari, S., Murphy, R. J. L., MacKinnon, A. R. S., Hollohan, Q., Macdougall, S. C., Courish, M. K., Kimmerly, D. S., & Neyedli, H. F. (2022). The impact of a short-period head-down tilt on executive function in younger adults. *Scientific Reports*, *12*(1), 20888. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25123-3>

Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *63*(2), 81-97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>

Mintz, F., Trafton, J., Marsh, E., & Perzanowski, D. (2004). Choosing Frames of Reference: Perspective-Taking in a 2D and 3D Navigational Task. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *48*. <https://doi.org/10.1177/154193120404801630>

Mitchell, J. P. (2008). Activity in right temporo-parietal junction is not selective for theory-of-mind. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *18*(2), 262-271. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm051>

Mittelstaedt, H. (1992). Somatic versus vestibular gravity reception in man. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *656*, 124-139. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1992.tb25204.x>

Mittelstaedt, H. (1995). New diagnostic tests for the function of utricles, saccules and somatic graviceptors. *Acta Oto-Laryngologica. Supplementum*, *520 Pt 1*, 188-193. <https://doi.org/10.3109/00016489509125225>

Miyake, S. (2020). [Mental Workload Assessment of Health Care Staff by NASA-TLX]. *Journal of UOEH*, *42*(1), 63-75. <https://doi.org/10.7888/juoeh.42.63>

Mukai, C. N., Lathers, C. M., Charles, J. B., Bennett, B. S., Igarashi, M., & Patel, S. (1991). Acute hemodynamic responses to weightlessness during parabolic flight. *Journal of Clinical Pharmacology*, *31*(10), 993-1000. <https://doi.org/10.1002/j.1552-4604.1991.tb03662.x>

Navasiolava, N. M., Custaud, M.-A., Tomilovskaya, E. S., Larina, I. M., Mano, T., Gauquelin-Koch, G., Gharib, C., & Kozlovskaya, I. B. (2011). Long-term dry immersion: Review and prospects. *European Journal of Applied Physiology*, *111*(7), 1235-1260. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1750-x>

Nelson, E. S., Mulugeta, L., & Myers, J. G. (2014). Microgravity-induced fluid shift and ophthalmic changes. *Life (Basel, Switzerland)*, *4*(4), 621-665. <https://doi.org/10.3390/life4040621>

Nico, D., Daprati, E., Rigal, F., Parsons, L., & Sirigu, A. (2004). Left and right hand recognition in upper limb amputees. *Brain: A Journal of Neurology*, *127*(Pt 1), 120-132. <https://doi.org/10.1093/brain/awh006>

Niedenthal, P. M., Barsalou, L. W., Ric, F., & Krauth-Gruber, S. (2005). Embodiment in the Acquisition and Use of Emotion Knowledge. In *Emotion and consciousness* (p. 21-50). The Guilford Press. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.01.005>

Nyborg, H., & Isaksen, B. (1974). A method for analysing performance in the rod-and-frame test. II Test of the Statistical Model. *Scandinavian Journal of Psychology*, *15*(1), 124-126. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1974.tb00564.x>

Oman, C. M. (2003). Human visual orientation in weightlessness. in: L.R. Harris, M.R. Jenkin (Eds.), *Levels of Perception*, 375-398.

Paillard, J. (1991). *Brain and Space*. OUP Oxford.

Palermo, L., Di Vita, A., Piccardi, L., Trallesi, M., & Guariglia, C. (2014a). Bottom-up and top-down processes in body representation: A study of brain-damaged and amputee patients. *Neuropsychology*, *28*(5), 772-781. <https://doi.org/10.1037/neu0000086>

- Palermo, L., Di Vita, A., Piccardi, L., Trallesi, M., & Guariglia, C. (2014b). Bottom-up and top-down processes in body representation : A study of brain-damaged and amputee patients. *Neuropsychology*, 28(5), 772-781. <https://doi.org/10.1037/neu0000086>
- Pavlou, M., Quinn, C., Murray, K., Spyridakou, C., Faldon, M., & Bronstein, A. M. (2011). The effect of repeated visual motion stimuli on visual dependence and postural control in normal subjects. *Gait & Posture*, 33(1), 113-118. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.10.085>
- Pavy-Le Traon, A., Heer, M., Narici, M. V., Rittweger, J., & Vernikos, J. (2007). From space to Earth : Advances in human physiology from 20 years of bed rest studies (1986-2006). *European Journal of Applied Physiology*, 101(2), 143-194. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0474-z>
- Perspective taking – APA Dictionary of Psychology*. (s. d.). Consulté 19 janvier 2021, à l'adresse <https://dictionary.apa.org/perspective-taking>
- Pinti, P., Aichelburg, C., Gilbert, S., Hamilton, A., Hirsch, J., Burgess, P., & Tachtsidis, I. (2018). A Review on the Use of Wearable Functional Near-Infrared Spectroscopy in Naturalistic Environments. *The Japanese Psychological Research*, 60(4), 347-373. <https://doi.org/10.1111/jpr.12206>
- Piper, S. K., Krueger, A., Koch, S. P., Mehnert, J., Habermehl, C., Steinbrink, J., Obrig, H., & Schmitz, C. H. (2014). A wearable multi-channel fNIRS system for brain imaging in freely moving subjects. *NeuroImage*, 85, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.06.062>
- Popa, I., Barborica, A., Scholly, J., Donos, C., Bartolomei, F., Lagarde, S., Hirsch, E., Valenti-Hirsch, M.-P., Maliia, M. D., Arbune, A. A., Daneasa, A., Ciurea, J., Bajenaru, O.-A., & Mindruta, I. (2019). Illusory own body perceptions mapped in the cingulate cortex-An intracranial stimulation study. *Human Brain Mapping*, 40(9), 2813-2826. <https://doi.org/10.1002/hbm.24563>
- Pozzo, T., Papaxanthis, C., Stapley, P., & Berthoz, A. (1998). The sensorimotor and cognitive integration of gravity. *Brain Research. Brain Research Reviews*, 28(1-2), 92-101. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(98\)00030-7](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(98)00030-7)
- Preuss, N., Harris, L. R., & Mast, F. W. (2013). Allocentric visual cues influence mental transformation of bodies. *Journal of Vision*, 13(12), 14-14. <https://doi.org/10.1167/13.12.14>
- Purcell, Z. A., Howarth, S., Wastell, C. A., Roberts, A. J., & Sweller, N. (2022). Eye tracking and the cognitive reflection test : Evidence for intuitive correct responding and uncertain heuristic responding. *Memory & Cognition*, 50(2), 348-365. <https://doi.org/10.3758/s13421-021-01224-8>
- Qureshi, A. W., Apperly, I. A., & Samson, D. (2010). Executive function is necessary for perspective selection, not Level-1 visual perspective calculation : Evidence from a dual-task study of adults. *Cognition*, 117(2), 230-236. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.08.003>
- Qureshi, A. W., Bretherton, L., Marsh, B., & Monk, R. L. (2020). Stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex impacts conflict resolution in Level-1 visual perspective taking. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 20(3), 565-574. <https://doi.org/10.3758/s13415-020-00786-5>
- Raine, A., Chen, F. R., & Waller, R. (2022). The Cognitive, Affective and Somatic Empathy Scales for Adults. *Personality and Individual Differences*, 185, 111238. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2021.111238>
- Ramsey, R., Hansen, P., Apperly, I., & Samson, D. (2013). Seeing it my way or your way : Frontoparietal brain areas sustain viewpoint-independent perspective selection processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(5), 670-684. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00345
- Reed, C. L. (2002). What is the body schema? In *The imitative mind : Development, evolution, and brain bases* (p. 233-243). Cambridge University Press.

<https://doi.org/10.1017/CBO9780511489969.014>

Ric, F., & Muller, D. (2017). Chapitre 1. Qu'entend-on par cognition sociale ? *Psycho en +*, 7-19.

Roberts, D. R., Zhu, X., Tabesh, A., Duffy, E. W., Ramsey, D. A., & Brown, T. R. (2015). Structural Brain Changes following Long-Term 6° Head-Down Tilt Bed Rest as an Analog for Spaceflight. *AJNR: American Journal of Neuroradiology*, 36(11), 2048-2054. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4406>

Robin, A., Auvinet, A., Degryse, B., Murphy, R., Bareille, M.-P., Beck, A., Gharib, C., Gauquelin-Koch, G., Daviet, A., Larcher, F., Custaud, M.-A., & Navasiolava, N. (2020). DI-5-CUFFS: Venoconstrictive Thigh Cuffs Limit Body Fluid Changes but Not Orthostatic Intolerance Induced by a 5-Day Dry Immersion. *Frontiers in Physiology*, 0. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00383>

Ruby, P., & Decety, J. (2001). Effect of subjective perspective taking during simulation of action: A PET investigation of agency. *Nature Neuroscience*, 4(5), Article 5. <https://doi.org/10.1038/87510>

Salehinejad, M. A., Ghanavati, E., Rashid, M. H. A., & Nitsche, M. A. (2021). Hot and cold executive functions in the brain: A prefrontal-cingular network. *Brain and Neuroscience Advances*, 5, 23982128211007770. <https://doi.org/10.1177/23982128211007769>

Samson, D., Apperly, I. A., Braithwaite, J. J., Andrews, B. J., & Bodley Scott, S. E. (2010). Seeing it their way: Evidence for rapid and involuntary computation of what other people see. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 36(5), 1255-1266. <https://doi.org/10.1037/a0018729>

Sandal, G. M. (2001). Psychosocial issues in space: Future challenges. *Gravitational and Space Biology Bulletin: Publication of the American Society for Gravitational and Space Biology*, 14(2), 47-54.

Sandal, G. M., Endresen, I. M., Vaernes, R., & Ursin, H. (1999). Personality and coping strategies during submarine missions. *Military Psychology: The Official Journal of the Division of Military Psychology, American Psychological Association*, 11(4), 381-404. https://doi.org/10.1207/s15327876mp1104_3

Saveko, A., Bekreneva, M., Ponomarev, I., Zelenskaya, I., Riabova, A., Shigueva, T., Kitov, V., Abu Sheli, N., Nosikova, I., Rukavishnikov, I., Sayenko, D., & Tomilovskaya, E. (2023). Impact of different ground-based microgravity models on human sensorimotor system. *Frontiers in Physiology*, 14, 1085545. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1085545>

Schneider, D., Lam, R., Bayliss, A. P., & Dux, P. E. (2012). Cognitive load disrupts implicit theory-of-mind processing. *Psychological Science*, 23(8), 842-847. <https://doi.org/10.1177/0956797612439070>

Schurz, M., Radua, J., Aichhorn, M., Richlan, F., & Perner, J. (2014). Fractionating theory of mind: A meta-analysis of functional brain imaging studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 42, 9-34. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.01.009>

Searle, J. A., & Hamm, J. P. (2017). Mental rotation: An examination of assumptions. *WIREs Cognitive Science*, 8(6), e1443. <https://doi.org/10.1002/wcs.1443>

Seymour, R. A., Wang, H., Rippon, G., & Kessler, K. (2018). Oscillatory networks of high-level mental alignment: A perspective-taking MEG study. *NeuroImage*, 177, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.05.016>

Shelhamer, M. (2016). Parabolic flight as a spaceflight analog. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 120(12), 1442-1448. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01046.2015>

Shenkman, B. S. (2020). How Postural Muscle Senses Disuse? Early Signs and Signals. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(14), 5037.

<https://doi.org/10.3390/ijms21145037>

Shenkman, B. S., & Kozlovskaya, I. B. (2019). Cellular Responses of Human Postural Muscle to Dry Immersion. *Frontiers in Physiology*, *10*, 187. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00187>

Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, *171*(3972), 701-703. <https://doi.org/10.1126/science.171.3972.701>

Sosnina, I. S., Lyakhovetskii, V. A., Zelenskiy, K. A., Karpinskaya, V. Yu., & Tomilovskaya, E. S. (2019). Effects of Five-Day “Dry” Immersion on the Strength of the Ponzo and the Müller-Lyer Illusions. *Neuroscience and Behavioral Physiology*, *49*(7), 847-856. <https://doi.org/10.1007/s11055-019-00811-2>

Stahn, A. C., Riemer, M., Wolbers, T., Werner, A., Brauns, K., Besnard, S., Denise, P., Kühn, S., & Gunga, H.-C. (2020). Spatial Updating Depends on Gravity. *Frontiers in Neural Circuits*, *14*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncir.2020.00020>

Stanton, N., Salmon, P., Walker, G., Baber, C., & Jenkins, D. (2005). Human Factors Methods : A Practical Guide for Engineering And Design. In *Human Factors Methods : A Practical Guide for Engineering and Design, 2nd Edition*. <https://doi.org/10.4324/9781351156325>

Steinberg, F., Kalicinski, M., Dalecki, M., & Bock, O. (2015). Human Performance in a Realistic Instrument-Control Task during Short-Term Microgravity. *PloS One*, *10*(6), e0128992. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128992>

Strangman, G. E., Sipes, W., & Beven, G. (2014). Human cognitive performance in spaceflight and analogue environments. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, *85*(10), 1033-1048. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3961.2014>

Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, *18*(6), 643-662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>

Tanaka, K., Nishimura, N., & Kawai, Y. (2017). Adaptation to microgravity, deconditioning, and countermeasures. *The Journal of Physiological Sciences: JPS*, *67*(2), 271-281. <https://doi.org/10.1007/s12576-016-0514-8>

Tasseel-Ponche, S., Le Liepvre, H., Colle, F., Andriantsifanetra, C., Vidal, P.-P., Bonan, I. V., & Yelnik, A.-P. (2017). Rod and frame test and posture under optokinetic stimulation used to explore two complementary aspects of the visual influence in postural control after stroke. *Gait & Posture*, *58*, 171-175. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.07.036>

Tomilovskaya, E., Shigueva, T., Sayenko, D., Rukavishnikov, I., & Kozlovskaya, I. (2019). Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects. *Frontiers in Physiology*, *10*, 284. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00284>

Tommasi, L., & Laeng, B. (2012). Psychology of spatial cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, *3*(6), 565-580. <https://doi.org/10.1002/wcs.1198>

Trousselard, M., Barraud, P., Nougier, V., Raphel, C., & Cian, C. (2004). Contribution of tactile and interoceptive cues to the perception of the direction of gravity. *Cognitive Brain Research*, *20*(3), 355-362. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.03.008>

Van Ombergen, A., Wuyts, F. L., Jeurissen, B., Sijbers, J., Vanhevel, F., Jillings, S., Parizel, P. M., Sunaert, S., Van de Heyning, P. H., Dousset, V., Laureys, S., & Demertzi, A. (2017). Intrinsic functional connectivity reduces after first-time exposure to short-term gravitational alterations induced by parabolic flight. *Scientific Reports*, *7*, 3061. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03170-5>

Velichkovsky, B. M., Rothert, A., Kopf, M., Dornhöfer, S. M., & Joos, M. (2002). Towards an express-diagnostics for level of processing and hazard perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *5*(2), 145-156. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(02\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(02)00013-X)

- Viel, S., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2010). Postural adaptation of the spatial reference frames to microgravity: Back to the egocentric reference frame. *PloS One*, 5(4), e10259. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010259>
- Waller, D., Montello, D. R., Richardson, A. E., & Hegarty, M. (2002). Orientation specificity and spatial updating of memories for layouts. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28(6), 1051-1063. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.28.6.1051>
- Wang, H., Callaghan, E., Gooding-Williams, G., McAllister, C., & Kessler, K. (2016). Rhythm makes the world go round: An MEG-TMS study on the role of right TPJ theta oscillations in embodied perspective taking. *Cortex*, 75, 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.11.011>
- Wang, H., Duan, J., Liao, Y., Wang, C., Li, H., & Liu, X. (2017). Objects Mental Rotation under 7 Days Simulated Weightlessness Condition: An ERP Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 553. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00553>
- Wardlow, L. (2013). Individual Differences in Speaker's Perspective Taking: The Roles of Executive Control and Working Memory. *Psychonomic bulletin & review*, 20(4), 10.3758/s13423-013-0396-1. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0396-1>
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625-636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>
- Witkin, H. A., & Asch, S. E. (1948a). Studies in space orientation. III. Perception of the upright in the absence of a visual field. *Journal of Experimental Psychology*, 38(5), 603-614. <https://doi.org/10.1037/h0055372>
- Witkin, H. A., & Asch, S. E. (1948b). Studies in space orientation. IV. Further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *Journal of Experimental Psychology*, 38(6), 762-782. <https://doi.org/10.1037/h0053671>
- Wolff, M., Frédéric, V., Brethault, M., Brisson, H., & Mollard, R. (2018, octobre 5). *Vers une possible compréhension de l'effet tunnel: Une étude exploratoire*.
- Wollseiffen, P., Klein, T., Vogt, T., Abeln, V., Strüder, H. K., Stuckenschneider, T., Sanders, M., Claassen, J. A. H. R., Askew, C. D., Carnahan, H., & Schneider, S. (2019). Neurocognitive performance is enhanced during short periods of microgravity-Part 2. *Physiology & Behavior*, 207, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2019.04.021>
- Wollseiffen, P., Vogt, T., Abeln, V., Strüder, H. K., Askew, C. D., & Schneider, S. (2016). Neurocognitive performance is enhanced during short periods of microgravity. *Physiology & Behavior*, 155, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.11.036>
- Wraga, M., Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (1999). The influence of spatial reference frames on imagined object- and viewer rotations. *Acta Psychologica*, 102(2-3), 247-264. [https://doi.org/10.1016/s0001-6918\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/s0001-6918(98)00057-2)
- Wraga, M., Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2000). Updating displays after imagined object and viewer rotations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26(1), 151-168. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.26.1.151>
- Wraga, M., Shephard, J. M., Church, J. A., Inati, S., & Kosslyn, S. M. (2005). Imagined rotations of self versus objects: An fMRI study. *Neuropsychologia*, 43(9), 1351-1361. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.11.028>
- Young, L. R., Shelhamer, M., & Modestino, S. (1986). M.I.T./Canadian vestibular experiments on the Spacelab-1 mission: 2. Visual vestibular tilt interaction in weightlessness. *Experimental Brain Research*, 64(2), 299-307. <https://doi.org/10.1007/BF00237747>
- Yuan, P., Koppelmans, V., Reuter-Lorenz, P., De Dios, Y., Gadd, N., Wood, S., Riascos, R., Kofman, I., Bloomberg, J., Mulavara, A., & Seidler, R. (2018). Vestibular brain changes within 70 days of head down bed rest. *Human Brain Mapping*, 39(7), 2753-2763.

<https://doi.org/10.1002/hbm.24037>

Zacks, J. M., & Michelon, P. (2005). Transformations of visuospatial images. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 4(2), 96-118. <https://doi.org/10.1177/1534582305281085>

Zacks, J. M., Ollinger, J. M., Sheridan, M. A., & Tversky, B. (2002). A parametric study of mental spatial transformations of bodies. *NeuroImage*, 16(4), 857-872. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1129>

Zacks, J. M., Vettel, J. M., & Michelon, P. (2003). Imagined viewer and object rotations dissociated with event-related fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(7), 1002-1018. <https://doi.org/10.1162/089892903770007399>

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

FIGURE 1 : PREMIER VOL SPATIAL DE L'UNION SOVIETIQUE AVEC LA MISSION VOSTOK 1 – 12 AVRIL 1961 (SOURCE : HTTPS://DESTINATION-ORBITE.NET/ASTRONAUTIQUE/COMPENDIUM/LES-LANCEURS-RUSSES-VOSTOK)	14
FIGURE 2 : LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE (NOVEMBRE 2009) (HTTPS://SPACEFLIGHT.NASA.GOV/GALLERY/IMAGES/SHUTTLE/STS-129/HIRES/S129E009243.JPG).....	15
FIGURE 3 : DISTRIBUTION DU LIQUIDE TISSULAIRE (OU FLUIDE INTERSTITIEL). L'OMBRE BLEUE INDIQUE LA DISTRIBUTION DE CE LIQUIDE ET LES PRESSIONS ARTERIELLES MOYENNES (MMHG) SUR TERRE AVANT LE VOL 1G (A GAUCHE), EN IMPESANTEUR 0G (AU MILIEU) ET SUR TERRE EN POST-VOL 1G (A DROITE). ILLUSTRATION ISSUE DE ZHANG & HARGENS, 2018.	16
FIGURE 4 : EXPEDITION 38 : RICK MASTRACCHIO ET KOICHI WAKATA SONT PHOTOGRAPHIES PENDANT LA PREPARATION DE LA CARGAISON CYGNUS DANS LE NŒUD HARMONY DE LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE – NASA IMAGE GALLERY.....	20
FIGURE 5 : ILLUSTRATION DU REFERENTIEL GEOCENTRE (CENTRE SUR LA TERRE) AVEC LES AXES DE COORDONNEES CARTESIENS TRIDIMENSIONNELS (REPERES CARTESIENS). LE REFERENTIEL GEOCENTRIQUE FAIT REFERENCE A LA GRAVITE TERRESTRE ET AUX REPERES ENVIRONNEMENTAUX QUI EN DECOULENT TELS QUE L'HORIZON, PAR EXEMPLE.	22
FIGURE 6 : PROTOCOLE DE SHEPARD ET METZLER (1971) PRESENTANT DES PAIRES DE FIGURES GEOMETRIQUES ET DEMANDANT AUX SUJETS DE REpondre S'IL S'AGIT DE LA MEME FIGURE DANS DES ORIENTATIONS DIFFERENTES (A/B) OU DE FIGURES DIFFERENTES (C).	24
FIGURE 7 : GRAPHIQUE ISSU DE L'ETUDE DE COOPER & SHEPARD (1973) REPRESENTANT LES DIFFERENTES CONDITIONS AU COURS DE LA TACHE DE ROTATION MENTALE DE CHIFFRES ET DE LETTRES. LE GRAPHIQUE DE DROITE REPRESENT L'EVOLUTION DES TEMPS DE REponses EN FONCTION DES DIFFERENTES CONDITIONS DE LA TACHE.	25
FIGURE 8 : EXPERIENCE 2 TIREE DE L'ARTICLE DE ZACKS ET AL. (2002) : PRESENTATION D'UNE SEULE FIGURE AYANT SUBI UNE ROTATION. EN L'ABSENCE DE REPERE VISUEL, DECIDER SI LE BRAS GAUCHE OU DROIT EST TENDU IMPLIQUE DES TEMPS DE REponses CONSTANTS INDEPENDAMMENT DE L'ANGLE DE ROTATION DE LA FIGURE SUGGERANT L'UTILISATION D'UN REFERENTIEL EGOCENTRE.	27
FIGURE 9 : ANALYSE DE LA REponse HEMODYNAMIQUE DANS LE CORTEX PARIETAL DROIT MONTRANT UNE RELATION POSITIVE AVEC LES ANGLES DE ROTATION POUR LA TACHE DE ROTATION MENTALE (ALLOCENTRE) ET UNE RELATION NEGATIVE POUR LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE (EGOCENTRE) (KEEHNER ET AL., 2006).....	32
FIGURE 10 : MODELE DE « <i>SENSEMAKING</i> » S'INSCRIVANT DANS LES THEORIES DE LA COGNITION INCARNEE (HTTPS://SYMBIOSCENE.COM/EMBODIED-SENSEMAKING/) – MODELE ADAPTE DES TRAVAUX DE DERVIN (1998) ET WEICK (1995)	35
FIGURE 11 : EXPERIMENTATION DE KEYSAR ET AL. (2000) AVEC DEUX VUES DE L'ETAGERE (ADDRESSEE'S VIEW = VUE DEPUIS LE PARTICIPANT VS DIRECTOR'S VIEW : VUE DEPUIS LE DIRECTEUR).....	36
FIGURE 12 : TACHES EXPERIMENTALES DE L'ETUDE DE CAVALLO ET AL., (2017) REPRESENTANT UNE SCENE PERÇUE PAR LE PARTICIPANT AU COURS D'UNE TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE (UN AVATAR EST ASSIS A UNE TABLE FACE AU PARTICIPANT)	37
FIGURE 13 : TACHE EXPERIMENTALE DE PRISE DE PERSPECTIVE DE MEIRHAEGHE ET MELAN (2016) REPRESENTANT DEUX AVATARS DE PART ET D'AUTRE D'UNE ETAGERE SUR LAQUELLE SE SITUENT DES OBJETS. CERTAINS DE CES OBJETS SE TROUVENT OCCULTES DU POINT DE VUE DE L'AVATAR QUI SE SITUE DERRIERE L'ETAGERE ET NON POUR LE PARTICIPANT, NECESSITANT AINSI DES APTITUDES DE THEORIE DE L'ESPRIT.	39
FIGURE 14 : EXPERIENCE DE MARTIN ET AL. (2020) NECESSITANT UNE PRISE DE PERSPECTIVE A LA PREMIERE PERSONNE OU A LA TROISIEME PERSONNE.....	41
FIGURE 15 : EXPERIENCE DE SAMSON ET AL. (2010) : VARIABLE 1 : CONSISTANT : POINTS DE VUE DIFFERENTS AVEC REponses IDENTIQUES ; VARIABLE 2 : INCONSISTANT : POINTS DE VUE DIFFERENTS AVEC REponses DIFFERENTES, SELON LE POINT DE VUE DE SOI OU AVATAR, LA REponse A LA TACHE N'EST PAS LA MEME, PAR EXEMPLE, DANS LA CONDITION INCONSISTANT L'AVATAR NE VOIT QU'UN SEUL DISQUE PAR CONTRE LE PARTICIPANT VOIT DEUX DISQUES.....	43

FIGURE 16 : MODELE DE ABU-AKEL & SHAMAY-TSOORY (2011).....	46
FIGURE 17 : MANŒUVRE PARABOLIQUE (3 PHASES : HYPERGRAVITE /IMPESANTEUR/ HYPERGRAVITE). SOURCE : WWW.AIRZEROG.COM	48
FIGURE 18 : ILLUSTRATION COMPARATIVE ENTRE MODELES EN VOL SPATIAL (A) ET MODELES EN BED-REST (ALITEMENT STANDARD VS ALITEMENT EN BED-REST (-6° D'INCLINAISON) (HARGENS & VICO, 2016).....	51
FIGURE 19 : METHODE D'IMMERSION SECHE (DRY IMMERSION) - MEDES CLINIQUE SPATIALE TOULOUSE (HOPITAL DE RANGUEIL), STRUCTURE CREEE PAR LE CHU DE TOULOUSE EN COLLABORATION AVEC LE CNES (CENTRE NATIONAL DES ETUDES SPATIALES)	53
FIGURE 20 : ILLUSTRATION REPRESENTANT LES BRASSARDS DE CUISSE (ROBIN ET AL., 2020)	54
FIGURE 21 : PHOTOGRAPHIE REALISEE LORS DE L'ETUDE PRELIMINAIRE EN VOL PARABOLIQUE. DEUX EXPERIMENTATEURS GERENT L'EXPERIMENTATION AVEC LES ORDINATEURS AU SOL DANS L'AVION ET LES DEUX AUTRES EXPERIMENTATEURS REALISENT LA TACHE ASSIS SUR LES SIEGES PREVUS A CET EFFET .	67
FIGURE 22 : INSTALLATION ET EQUIPEMENTS DES PARTICIPANTS LORS DE LA REALISATION DE LA TACHE DANS L'AVION ZERO-G	70
FIGURE 23 : DEROULEMENT DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL : 3 SEANCES	71
FIGURE 24 : IMAGE EXTRAITE DU PROTOCOLE DE PRISE DE PERSPECTIVE REPRESENTANT L'ETAGERE CARREE FLOTTANT DANS LE VAISSEAU SPATIAL. ELLE COMPORTE DE NOMBREUX COMPARTIMENTS OU SONT POSITIONNES 3 OBJETS IDENTIQUES (ICI DES EXTINGUEURS)	73
FIGURE 25 : CONDITION CONTROLE « PERCEPTION DIRECTE » : ETAGERE A LA VERTICALE AVEC AVATAR DEVANT L'ETAGERE A LA VERTICALE	75
FIGURE 26 : CONDITION CONTROLE « PRISE DE PERSPECTIVE STANDARD » : ETAGERE A LA VERTICALE, AVATAR DERRIERE L'ETAGERE, EGALEMENT A LA VERTICALE	76
FIGURE 27 : CONDITION CRITIQUE : "INCLINAISON ETAGERE" : L'ETAGERE EST INCLINEE (-45°/+45°) ET L'AVATAR EST A LA VERTICALE DERRIERE L'ETAGERE	76
FIGURE 28 : CONDITION CRITIQUE : « INCLINAISON AVATAR » OU SEUL L'AVATAR EST INCLINE (-45°/+45°)	77
FIGURE 29 : CONDITION CRITIQUE " INCLINAISON CONGRUENTE".....	77
FIGURE 30 : ILLUSTRATION REPRESENTANT LE TEST AVEC INCLINAISON DE LA BAGUETTE (VOLET A GAUCHE) ET DE LA BAGUETTE ET DU CADRE (VOLETS A DROITE). LES INDIVIDUS DEPENDANT DU CHAMP VISUEL (« FIELD-DEPENDENT ») N'ALIGNENT PAS CORRECTEMENT LA BAGUETTE ALORS QU'A DROITE, CEUX INDEPENDANTS DU CHAMP VISUEL (« NON FIELD-DEPENDENT ») ALIGNENT CORRECTEMENT LA BAGUETTE A LA VERTICALE, INDEPENDAMMENT DE LA PRESENCE DU CADRE INCLINE (MEIRHAEGHE ET AL., 2020)..	79
FIGURE 31 : DISPOSITIF DE TUNNEL OPTIQUE (CYLINDRE NOIR APPOSE SUR L'ECRAN DE L'ORDINATEUR).	80
FIGURE 32 : SCHEMA DES CONDITIONS CONTROLES ET CRITIQUES DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE ..	86
FIGURE 33 : TEMPS DE REPONSE MOYENS ET ECART-TYPE (ET) (EN SECONDES) DES PARTICIPANTS POUR CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE AU COURS DE LA PHASE DE PRE-VOL AU SOL (* P < .05 ; ** P < .01). LES CONDITIONS CONTROLES SONT LES BATONNETS BLEUS ET LES CONDITIONS CRITIQUES LES BATONNETS JAUNES.	87
FIGURE 34 : TAUX MOYENS DE REPONSES CORRECTES ET ET (%) DES PARTICIPANTS POUR CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE AU COURS DE LA PHASE DE PRE-VOL AU SOL. LES CONDITIONS CONTROLES SONT LES BATONNETS BLEUS ET LES CONDITIONS CRITIQUES LES BATONNETS JAUNES.	88
FIGURE 35 : TEMPS MOYENS DE REPONSE ET ET (SECONDES) DANS CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE EN PHASES DE PRE-VOL ET DE POST-VOL (P < .05* ; P < .01** ; P < .001***). ...	89
FIGURE 36 : TAUX DE REPONSES CORRECTES (%) DANS CHAQUE CONDITION DANS LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE EN PHASES DE PRE-VOL ET DE POST-VOL (P < .01**).	90
FIGURE 37 : TEMPS MOYENS DE REPONSE ET ET (SECONDES) DANS CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE LORS DES SESSIONS DE 1G EN VOL ET EN POST-VOL.	91
FIGURE 38 : TAUX DE REPONSES CORRECTES (%) ET ET DANS CHAQUE CONDITION DANS LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE EN PHASES DE 1G EN VOL ET POST-VOL.	91
FIGURE 39 : TAUX MOYENS ET ET (%) D'EXIGENCE PHYSIQUE ET TEMPORELLE RESSENTIS PAR LES PARTICIPANTS AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE EN 1G EN VOL ET POST-VOL (P < .05*)	92
FIGURE 40 : TEMPS DE REPONSES MOYENS ET ET (EN SECONDES) POUR CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE EN 0G ET EN 1G (DONNEES 1G EN VOL + POST-VOL) (P < .05* ; P < .01**)	93
FIGURE 41 : TAUX DE REPONSES CORRECTES ET ET (%) POUR CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE ENTRE LES PHASES DE 1G (EN VOL ET POST-VOL) ET 0G	94
FIGURE 42 : TAUX MOYENS ET ET (%) D'EXIGENCE MENTALE, D'EFFORT MENTAL ET DE PERFORMANCE RESSENTIS PAR LES PARTICIPANTS AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE EN 0G ET 1G (P < .01** ; P < .05*)	95

FIGURE 43 : TAUX MOYENS (%) D'EXIGENCE PHYSIQUE, TEMPORELLE ET DE FRUSTRATION RESSENTIS PAR LES PARTICIPANTS AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE EN 0G ET 1G ($P < .01^{**}$).....	96
FIGURE 44 : TEMPS DE REPONSES MOYENS ET ET (SEC) DES DEUX SOUS-GROUPES DE PARTICIPANTS VISUO-INDEPENDANTS ET VISUO-DEPENDANTS DANS LES CONDITIONS « INCLINAISON AVATAR » ET « INCLINAISON CONGRUENTE » REGROUPEES EN 0G ($P < .05^{*}$).....	98
FIGURE 45 : TAUX DE REPONSES CORRECTES ET ET (%) DES DEUX SOUS-GROUPES DE PARTICIPANTS VISUO-INDEPENDANTS ET VISUO-DEPENDANTS DANS LES CONDITIONS « INCLINAISON AVATAR » ET « INCLINAISON CONGRUENTE » REGROUPEES EN 0G.....	98
FIGURE 46 : SCORE INDIVIDUEL DE QUOTIENT D'EMPATHIE POUR CHAQUE PARTICIPANT. SCORE SEUIL (30) REPRESENTÉ PAR DES POINTILLES. DEUX PARTICIPANTS SE SITUENT EN DESSOUS DU SCORE SEUIL DE 30 : LES PARTICIPANTS 1 ET 10 AVEC RESPECTIVEMENT 23 ET 29 DE QE.....	99
FIGURE 47 : PARTICIPANT DANS LE DISPOSITIF D'IMMERSION SECHE PORTANT LE BONNET NIRS ET LE TUNNEL OPTIQUE	112
FIGURE 48 : DEROULEMENT DE LA PREMIERE PHASE DU TEST DE ROTATION MENTALE (A GAUCHE L'ITEM EST PRESENTE NORMALEMENT, A DROITE L'ITEM EST PRESENTE EN MIROIR).....	113
FIGURE 49 : DEROULEMENT DE LA SECONDE PHASE DE TEST (ICI L'ITEM CIBLE EST EN MIROIR).....	114
FIGURE 50 : DEROULEMENT DE LA PHASE DE TEST DU TEMPS DE REACTION SIMPLE	114
FIGURE 51 : CONDITION CONTROLE DU TEST D'INHIBITION : CROIX DE FIXATION SUIVIE DE LA PRESENTATION DE L'ITEM « ROUGE » ECRIT ICI EN COLORIS ROUGE : CONDITION CONGRUENTE. LES TOUCHES 1, 2, 3 ET 4 SONT RESPECTIVEMENT EN VERT, ROUGE, JAUNE ET BLEU.....	115
FIGURE 52 : CONDITION INTERFERENCE DU TEST D'INHIBITION : CROIX DE FIXATION SUIVIE DE LA PRESENTATION DE L'ITEM « ROUGE » ECRIT ICI EN COLORIS VERT : CONDITION INCONGRUENTE	116
FIGURE 53 : CLAVIER NUMERIQUE ET TOUCHES REPONSES VERTE, ROUGE, JAUNE ET BLEUE	116
FIGURE 54 : EXEMPLE D2 : L'OBJECTIF DE CE TEST EST D'ENTOURER LES D ENTOURES DE DEUX TRAITS.	118
FIGURE 55 : ILLUSTRATION DU FONCTIONNEMENT DE LA NIRS A L'AIDE DE DEUX OPTODES, UNE EMETTRICE (EMISSION) ET UNE RECEPTRICE (DETECTION). LORSQUE LA ZONE CORTICALE N'EST PAS ACTIVEE, LA MESURE DE DESOXYHEMOGLOBINE HHb EST PLUS IMPORTANTE QUE CELLE DE L'OXYHEMOGLOBINE HbO ; AU CONTRAIRE LORSQUE LA ZONE CORTICALE EST ACTIVEE, L'OXYHEMOGLOBINE HbO EST PLUS ELEVEE QUE LA DESOXYHEMOGLOBINE HHb.....	119
FIGURE 56 : A GAUCHE, LE BONNET NIRS EST DISPOSE SUR UN SUJET TEST. A DROITE, L'EQUIPEMENT NIRS UTILISE PERMETTANT DE RECUEILLIR LES DONNEES EN HYPERSCANNING.....	120
FIGURE 57 : REPRESENTATION DU POSITIONNEMENT DES OPTODES SOURCES EN ROUGE ET DETECTEURS EN VERT AU COURS DE L'ETUDE D'IMMERSION SECHE.....	121
FIGURE 58 : PARTICIPANT LORS DU PROTOCOLE D'IMMERSION SECHE EQUIPE DU DISPOSITIF D'EYE-TRACKING ET LE BONNET NIRS	122
FIGURE 59 : POSITIONNEMENT DES AOIS DANS LA CONDITION « INCLINAISON ETAGERE » DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE	123
FIGURE 60 : TEMPS DE REPONSES MOYENS ET ET (SECONDES) DANS LES CONDITIONS CONTROLES (EN ROUGE) ET CRITIQUES (EN BLEU) DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE EN PRE-IMMERSION (BDC-2) ($P < .01^{**}$; $P < .001^{***}$).....	130
FIGURE 61 : TAUX DE REPONSES CORRECTES ET ET (%) DANS CHAQUE CONDITION CONTROLE (BATONNETS ROUGES) ET CRITIQUE (BATONNETS BLEUS) DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE EN PRE-IMMERSION (BDC-2) ($P < .05^{*}$; $P < .01^{**}$; $P < .001^{***}$).....	130
FIGURE 62 : TEMPS DE REPONSE MOYENS ET ET (SEC) ENTRE PRE-IMMERSION (BATONNETS EN JAUNE) ET DI-5 (BATONNETS EN BLEU) POUR LE GROUPE « TEST » (RESULTAT AU TEST DE WILCOXON, $P < .05^{*}$).....	131
FIGURE 63 : TAUX DE REPONSES CORRECTES ET ET (%) POUR CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE ENTRE LA SESSION DE PRE-IMMERSION (BATONNETS JAUNE) ET DI-5 (5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION) (BATONNETS BLEU).....	132
FIGURE 64 : TEMPS DE REPONSES MOYENS ET ET (SEC) ENTRE LES SESSIONS DE PRE-IMMERSION (BATONNETS JAUNE) ET DI-5 (5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION) (BATONNETS BLEU) POUR LE GROUPE « CONTRE-MESURE » (RESULTAT AU TEST DE WILCOXON, $P < .05^{*}$).....	132
FIGURE 65 : TAUX DE REPONSES CORRECTES ET ET (%) POUR CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE ENTRE LA SESSION DE PRE-IMMERSION (BATONNETS JAUNE) ET DI-5 (5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION) (BATONNETS BLEU) POUR LE GROUPE « CONTRE-MESURE »	133
FIGURE 66 : TEMPS DE REPONSES MOYENS ET ET (SEC) DANS LES GROUPE « TEST » (BATONNETS VERTS) ET « CONTRE-MESURE » (BATONNETS MARRONS) LORS DU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION DANS CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE (RESULTAT AU TEST DE WILCOXON, $P = 0.05^{*}$).....	133

FIGURE 67 : TAUX DE REPONSES CORRECTES ET ET (%) DANS CHAQUE CONDITION DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE POUR CHACUN DES GROUPES « TEST » (BATONNETS VERTS) ET « CONTRE-MESURE » (BATONNETS MARRONS) AU COURS DU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION.....	134
FIGURE 68 : CONCENTRATION DE HbO (ECART MOYEN) (MMOL) DANS LES REGIONS TEMPORALES GAUCHE ET DROITE AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE LORS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION (BATONNETS JAUNES) ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION (BATONNETS BLEUS) DANS LES DEUX GROUPES (RESULTAT AU TEST DE WILCOXON, P = 0.05*).	135
FIGURE 69 : CONCENTRATION DE HbO (ECART MOYEN) (MMOL) DANS LES REGIONS PARIETALES GAUCHE ET DROITE AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE LORS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION (BATONNETS JAUNES) ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION (BATONNETS BLEUS) DANS LES DEUX GROUPES.	136
FIGURE 70 : TEMPS DE FIXATION OCULAIRE PAR AOI (AVATAR, OBJET CORRECT, OBJET INCORRECT) ET ET (MSEC) DANS LA CONDITION « INCLINAISON AVATAR » AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION (P < .05*).	137
FIGURE 71 : NOMBRE MOYEN DE FIXATIONS OCULAIRES PAR AOI ET ET DANS LA CONDITION « INCLINAISON AVATAR » AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION (P < .05*)... ..	138
FIGURE 72 : TEMPS DE REPONSES MOYENS ET ET (EN SECONDES) POUR CHAQUE SOUS-GROUPE DE STYLE COGNITIF LORS DES PHASES DE PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION DANS LES DEUX GROUPES TEST (BATONNETS EN VERT) ET CONTRE-MESURE (BATONNETS EN MARRON).....	140
FIGURE 73 : TAUX MOYEN DE REPONSES CORRECTES ET ET (%) POUR CHAQUE SOUS-GROUPE DE STYLE COGNITIF LORS DES PHASES DE PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION DANS LES DEUX GROUPES TEST (BATONNETS EN VERT) ET CONTRE-MESURE (BATONNETS EN MARRON).....	141
FIGURE 74 : TEMPS DE REPONSE MOYEN ET ET (MSEC) AU COURS DES ESSAIS AVEC FLECHE DE LA TACHE DE ROTATION MENTALE, DANS LES CONDITIONS D'ANGLES SUPERIEURS A L'HORIZON (BATONNETS MARRONS) ET D'ANGLES INFERIEURS A L'HORIZON (BATONNETS BLEUS) DANS LES DEUX GROUPES TEST ET CONTRE-MESURE AU COURS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION (P < .05*).	142
FIGURE 75 : NOMBRE MOYEN DE REPONSES CORRECTES ET ET (MAX. 4) DANS LES ESSAIS AVEC FLECHE, PAR CONDITION D'ANGLE : SUPERIEURS A L'HORIZON (BATONNETS MARRONS) ET INFERIEURS A L'HORIZON (BATONNETS BLEUS) DANS LES DEUX GROUPES « TEST » ET « CONTRE-MESURE » AU COURS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION.	143
FIGURE 76 : TEMPS DE REPONSE MOYEN ET ET (MSEC) AU COURS DES ESSAIS SANS FLECHE DE LA TACHE DE ROTATION MENTALE, DANS LES CONDITIONS D'ANGLES SUPERIEURS A L'HORIZON (BATONNETS MARRONS) ET D'ANGLES INFERIEURS A L'HORIZON (BATONNETS BLEUS) DANS LES DEUX GROUPES TEST ET CONTRE-MESURE AU COURS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION	144
FIGURE 77 : NOMBRE MOYEN DE REPONSES CORRECTES ET ET (MAX. 4) PAR CONDITION D'ANGLE DANS LES ESSAIS SANS FLECHE : SUPERIEURS A L'HORIZON (BATONNETS MARRONS) ET INFERIEURS A L'HORIZON (BATONNETS BLEUS) DANS LES DEUX GROUPES « TEST » ET « CONTRE-MESURE » AU COURS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION.	144
FIGURE 78 : COMPARAISON DES TEMPS DE REACTIONS MOYENS (MSEC) POUR CHAQUE GROUPE AU COURS DE DEUX SESSIONS D'EXPERIMENTATION : PRE-IMMERSION ET DI-5.....	145
FIGURE 79 : TEMPS DE REPONSES MOYENS ET ET (MSEC) DANS LA CONDITION INTERFERENCE AU COURS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION POUR LES DEUX GROUPES « CONTRE-MESURE » (BATONNETS MARRONS) ET « TEST » (BATONNETS VERTS).	146
FIGURE 80 : NOMBRE MOYEN D'ERREURS DANS LA CONDITION INTERFERENCE AU COURS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION POUR LES DEUX GROUPES « CONTRE-MESURE » (BATONNETS MARRONS) ET « TEST » (BATONNETS VERTS).	147
FIGURE 81 : EMPAN MNESIQUE ENDROIT (RETENTION D'UNE SERIE DE CHIFFRES EN MEMOIRE A COURT TERME) POUR LES DEUX GROUPES TEST (BATONNETS VERTS) ET CONTRE-MESURE (BATONNETS MARRONS) EN PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION.....	147
FIGURE 82 : EMPAN MNESIQUE ENVERS (RETENTION D'UNE SERIE DE CHIFFRES EN MEMOIRE DE TRAVAIL) POUR LES DEUX GROUPES TEST (BATONNETS VERTS) ET CONTRE-MESURE (BATONNETS MARRONS) EN PRE-IMMERSION ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION.....	148
FIGURE 83 : INDICE DE CONCENTRATION ET ET (KL) LORS DU TEST D'ATTENTION D2 AU COURS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION (BATONNETS JAUNES) ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION (BATONNETS BLEUS) POUR LES DEUX GROUPES TEST ET CONTRE-MESURE (P < .05* ; P < .01**).	148
FIGURE 84 : INDICE DE PERFORMANCE QUALITATIVE (POURCENTAGE D'ERREURS ; F%) LORS DU TEST D'ATTENTION D2 AU COURS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION (BATONNETS JAUNES) ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION (BATONNETS BLEUS) POUR LES DEUX GROUPES TEST ET CONTRE-MESURE (P < .05*)....	149

FIGURE 85 : CONCENTRATION DE HbO (ECART MOYEN) (MMOL) DANS LES REGIONS PREFRONTALES GAUCHE ET DROITE AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE LORS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION (BATONNETS JAUNES) ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION (BATONNETS BLEUS) DANS LES DEUX GROUPES.	150
FIGURE 86 : CONCENTRATION DE HbO (ECART MOYEN) (MMOL) DANS LA REGION FRONTALE GAUCHE AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE LORS DES DIFFERENTES SESSIONS DE PRE-IMMERSION A POST-IMMERSION DANS LES DEUX GROUPES ($P < .05^*$).	151
FIGURE 87 : CONCENTRATION DE HbO (ECART MOYEN) (MMOL) DANS LES REGIONS FRONTALES GAUCHE ET DROITE AU COURS DE LA TACHE DE PRISE DE PERSPECTIVE LORS DES SESSIONS DE PRE-IMMERSION (BATONNETS JAUNES) ET AU 5 ^{EME} JOUR D'IMMERSION (BATONNETS BLEUS) DANS LES DEUX GROUPES ($P < .05^*$).	151
FIGURE 88 : SCORE MOYEN ET ET POUR LES INDICES SENSORIELS POUR LES DEUX GROUPES DE PARTICIPANTS A CHAQUE SESSION DE TESTS (DE PRE-IMMERSION A POST-IMMERSION).	152
FIGURE 89 : SCORE MOYEN ET ET POUR LES INDICES AFFECTIFS POUR LES DEUX GROUPES DE PARTICIPANTS A CHAQUE SESSION DE TESTS (DE PRE-IMMERSION A POST-IMMERSION).	153
FIGURE 90 : QUESTIONNAIRES PROPOSES AUX PARTICIPANTS PAR ROBIN ET AL. (2020) AU COURS DU PROTOCOLE D'IMMERSION SECHE	154

TABLEAUX

TABLEAU 1 : DONNEES SOCIODEMOGRAPHIQUES DES PARTICIPANTS (NR : NON RENSEIGNE).....	69
TABLEAU 2 : DEGRE DE DEVIATION MOYEN PAR RAPPORT A LA VERTICALE POUR CHAQUE PARTICIPANT DANS LA CONDITION SANS CADRE (INCLINAISON DE LA BAGUETTE DE 40° A GAUCHE OU A DROITE).....	97
TABLEAU 3 : DEGRE DE DEVIATION MOYEN PAR RAPPORT A LA VERTICALE POUR CHAQUE PARTICIPANT DANS LA CONDITION AVEC CADRE (INCLINAISON DE LA BAGUETTE ET DU CADRE).	97
TABLEAU 4 : <i>DEROULEMENT DU PROTOCOLE EN IMMERSION SECHE POUR UN BINOME</i>	110
TABLEAU 5 : DONNEES SOCIODEMOGRAPHIQUES DES DEUX GROUPES (NR : NON RENSEIGNE).....	111
TABLEAU 6 : JOURS D'EXPERIMENTATIONS AU COURS DU PROTOCOLE D'IMMERSION SECHE.....	124
TABLEAU 7 : ORDRE DE PASSATION DES TESTS ALTERNES ENTRE CHAQUE SESSION LORS DU PROTOCOLE EN IMMERSION SECHE	124
TABLEAU 8 : DEGRE DE DEVIATION DE L'ANGLE PAR RAPPORT A LA VERTICALE POUR LES ESSAIS SANS CADRE AU TEST EVALUANT LE STYLE COGNITIF DES PARTICIPANTS.	139
TABLEAU 9 : DEGRE DE DEVIATION DE L'ANGLE PAR RAPPORT A LA VERTICALE DANS LES ESSAIS AVEC CADRE POUR CHAQUE PARTICIPANT.....	139

ANNEXE 1 : CPP Expérience en vol parabolique

COMITE DE PROTECTION DES PERSONNES ILE DE FRANCE X

HOPITAL ROBERT BALLANGER
Boulevard Robert Ballanger - 93602 Aulnay-sous-bois cedex
Tél. : 01 49 36 73 57 - E-mail : cpp.iledefrance10@ch-aulnay.fr
Président : Pr. Philippe Casassus

Madame Catherine JESSUS
CNRS
Institut des sciences biologiques
3, rue Michel-Ange
75794 PARIS cedex 16

Aulnay-sous-Bois, le 11 décembre 2017

Vos réf. : 17-006 (vices-persp)

Nos réf : protocole 69-2017

N° ID RCB : 2017-A02571-52

Recherche ne comportant que des risques et contraintes minimales mentionnée au 2° de l'article L.1121-2 du CSP

Chère Madame,

Le Comité de Protection des Personnes Ile-de-France X a été saisi par vous-même d'une demande d'avis initial pour le protocole de recherche interventionnelle intitulé :

« Prise de perspective d'autrui en microgravité : rôle des informations visuelles et vestibulaires. »

dont le CNRS est le promoteur

et le Dr Anne Pavy-Le Traon (Hôpital Pierre Paul Riquet, Toulouse) est l'investigateur coordonnateur.

Le Comité réuni en session ce Lundi 11 décembre 2017 a examiné ce projet de recherche interventionnelle et émet un avis favorable d'emblée à sa réalisation en France, au regard des éléments suivants :

- Courrier de soumission au CPP du 13/09/2017
- Formulaire de demande d'avis initial au CPP sur une recherche interventionnelle du 04/10/2017
- Attestation d'assurance du 13/09/2017
- Protocole de recherche v. 1 du 27/09/2017
- Résumé v. 1 du 27/09/2017
- Notice d'information au participant/ consentement v. 1 du 27/09/2017
- Autorisation de lieu de recherches biomédicales de l'ARS Aquitaine pour l'Airbus A310 Zéro-G (aéroport Merignac de Bordeaux) du 13/05/2015
- CV de l'investigateur coordonnateur du 30/06/2017 et CV de 9 collaborateurs

COMITE DE PROTECTION DES PERSONNES ILE DE FRANCE X

HOPITAL ROBERT BALLANGER

Boulevard Robert Ballanger - 93602 Aulnay-sous-bois cedex
Tél. : 01 49 36 73 57 - E-mail : cpp.iledefrance10@ch-aulnay.fr

Président : Pr. Philippe Casassus

Ont participé à la délibération les membres du Comité suivants

- ☒ Compétence en recherche impliquant la personne humaine :
Monsieur Philippe CASASSUS titulaire
Monsieur Jean-Luc DURAND titulaire
Monsieur Jean-Luc GAILLARD titulaire
Monsieur Pierre DEBLOIS titulaire
- ☒ Médecin généraliste : Madame Elisabeth HENON titulaire
- ☒ Pharmacienne : Madame Patricia LEROUX suppléante
- ☒ Compétence en matière de questions éthiques :
Monsieur Daniel FAUCHER titulaire
- ☒ Psychologue : Monsieur Luc BAUMARD titulaire
- ☒ Représentantes d'associations agréées de malades ou d'usagers du système de santé :
Madame Marie-Claude FEINSTEIN titulaire
Madame Catherine OLLIVET titulaire

Ont assisté au débat sans participation les membres suppléants suivants

- ☒ Compétence en recherche impliquant la personne humaine :
Monsieur Dominique PATERON suppléant
- ☒ Médecin généraliste : Monsieur Jean-Luc FONTENOY suppléant
- ☒ Psychologue : Madame Monique KAEPPELIN suppléante

Je vous prie de croire, Chère Madame, en l'expression de mes salutations les meilleures.



Le Président,
Pr. Philippe CASASSUS

[CET AVIS COMPORTE DEUX PAGES]

Au cas où il apparaîtrait nécessaire de présenter à notre Comité une demande de modifications au protocole, nous vous prions de lui adresser la nouvelle version des documents proposés, en indiquant de façon facilement visible les modifications apportées (version avec modifications apportées et version finale).

PROTOCOLE 69-2017 / 17-006 / 2017-A02571-52 – soumission initiale / cat-2 (avis favorable)



ANNEXE 2 : Consentement Expérience en vol parabolique

CNRS – VIVES-PERSP

CONSENTEMENT

Je soussigné (Nom, prénom)
Domicilié

ACCEPTE DE PARTICIPER A CETTE RECHERCHE DANS LES CONDITIONS PRECISEES
CI-DESSUS ET DONT LE TITRE EST :

« Prise de perspective d'autrui en microgravité : rôle des informations visuelles et
vestibulaires »

Etude N°ID-RCB : XXXXXXXXX

1. J'ai été pleinement informé par le médecin investigateur, de sa nature, de son but et de sa durée, et de ce qui est attendu de moi. J'ai été averti de tous les désagréments et risques potentiels pour ma santé et mon bien-être qui peuvent en résulter. Le document d'information ci-dessus m'a été fourni et j'en ai pris connaissance.

2. J'ai eu la possibilité de poser des questions sur tous les aspects de l'étude et j'ai compris les réponses et l'information qui m'ont été données.

3. J'accepte que le médecin investigateur contacte mon médecin traitant ou un médecin de mon choix pour l'informer de ma participation à l'étude et j'autorise mon médecin à communiquer des informations sur mes antécédents médicaux et des traitements que j'ai pu recevoir, dans le respect du secret médical.

4. J'accepte de suivre toutes les instructions qui me seront données pendant l'étude. J'accepte de coopérer entièrement et d'informer immédiatement le médecin investigateur de toute altération de ma santé ou de mon bien-être de n'importe quelle nature, ou de tout symptôme inattendu ou inhabituel de quelque manière qu'il soit apparu.

5. Les données qui me concernent sont strictement confidentielles. Je n'autorise leur consultation que par des représentants des Autorités de Santé ou par les responsables de l'étude.

6. J'accepte, compte tenu des nécessités de la Recherche, que les données enregistrées à l'occasion de cette étude puissent faire l'objet d'un traitement informatisé. J'ai bien noté que la mise en œuvre de mes droits d'accès et de rectification relative aux informations me concernant devra s'effectuer auprès du médecin investigateur.

7. Je sais que, conformément au Code de la Santé Publique «Titre 2 du Livre 1», je serai inscrit de façon confidentielle dans le Fichier National des personnes qui se prêtent à des recherches biomédicales.

CNRS – Etude VIVES-PERSP – Fiche d'information et de consentement du patient - 04/07/2017

Paraphe du volontaire :

10

8. J'accepte de ne pas restreindre l'utilisation qui sera faite des résultats de l'étude et en particulier, j'accepte que ces résultats puissent être divulgués aux Autorités Administratives de santé dans le monde entier, sachant que mon identité ne sera pas dévoilée.

9. J'ai compris que je suis libre de me retirer de l'étude à n'importe quel moment, sans condition.

10. J'accepte de ne pas participer à un autre protocole pendant une durée de 8 jours.

11. Je m'engage à être facilement joignable au numéro de téléphone que j'ai communiqué à l'équipe scientifique.

12. J'ai bien compris qu'à l'issue de la recherche je serai informé par courrier des résultats globaux de la recherche.

13. Je confirme qu'un exemplaire de ce document m'a été remis. Mon consentement ne décharge pas les organisateurs de la recherche de leurs responsabilités. Je conserve tous mes droits garantis par la loi.

14. Je ne recevrai pas d'indemnité pour ma participation à cette étude.

Sujet volontaire :

Date de signature : / /

Signature précédée de la mention :

« J'atteste sur l'honneur ne pas être sous mesure de sauvegarde de justice, tutelle ou curatelle. Signature après lecture »

.....
.....
.....

Investigateur :

Date de signature : / /

Signature :

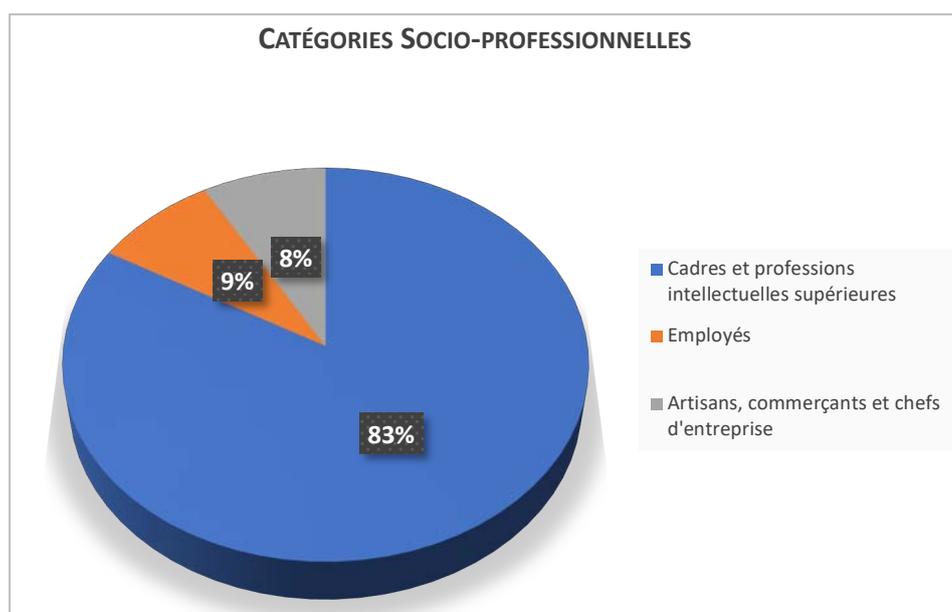
Remarque : chaque page doit être paraphée par l'investigateur et le volontaire

ANNEXE 3 : Catégories socio-professionnelles des participants à l'étude en vol parabolique

Données participants (âge, niveau d'études, profession)

Participants	Age	Niveau d'études	Profession
1	42 ans	Bac+5	Professeur d'EPS
2	49 ans	Bac+5	Ingénieur
3	48 ans	BEPC Niv. 1 ^{ère}	Agent de sécurité
4	45 ans	Bac+3	Kinésithérapeute
5	41 ans	Bac+5	Ingénieur (Supaero)
6	45 ans	Bac+5	Ingénieur ENTPE
7	48 ans	Brevet	Paysagiste
8	41 ans	Bac+2 (BTS)	Pilote de ligne
9	47 ans	Bac+8	Médecin généraliste
10	46 ans	Bac+4	Ingénieur
11	45 ans	DUT	Responsable de ventes
12	35 ans	Bac+5	Animateur qualité

Représentation de la répartition des participants en fonction de leurs catégories socio-professionnelles (selon la nomenclature des professions et catégories socio-professionnelle de l'INSEE).



ANNEXE 4 : Questionnaire de quotient d'empathie (EQ)

The Cambridge Behaviour Scale

(Baron-Cohen & Wheelwright, 2004)

Adaptation française

Veillez compléter ces informations et ensuite lire les instructions ci-dessous.

**TOUTES LES INFORMATIONS RESTERONT STRICTEMENT
CONFIDENTIELLES.**

Initiales : Sexe :
Date de naissance : Date de passation :

Comment remplir cette échelle :

Voici une liste de situation. Veuillez lire chacune d'elles très attentivement et précisez en entourant la réponse dans quelle mesure vous êtes d'accord ou pas. Il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses, ni de question piège.

**POUR QUE CETTE ECHELLE SOIT VALIDE, VOUS DEVEZ REpondre À
CHAQUE QUESTION.**

Exemples :

E1. Je serais très contrarié(e) si je ne pouvais pas écouter de musique tous les jours. tout à fait d'accord plutôt d'accord plutôt pas d'accord pas du tout d'accord

E2. Je préfère téléphoner à mes amis plutôt que leur écrire. tout à fait d'accord plutôt d'accord plutôt pas d'accord pas du tout d'accord

E3. Je n'ai pas réellement envie de voyager à travers le monde. tout à fait d'accord plutôt d'accord plutôt pas d'accord pas du tout d'accord

E4. Je préfère lire que danser. tout à fait d'accord plutôt d'accord plutôt pas d'accord pas du tout d'accord

1. Je peux facilement dire quand quelqu'un veut entamer une conversation.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
2. Je préfère les animaux aux êtres humains.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
3. J'essaie d'être à la mode.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
4. Je trouve difficile d'expliquer aux autres des choses que j'ai comprises facilement et que eux n'ont pas comprises du premier coup.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
5. Je rêve la plupart des nuits.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
6. J'aime prendre soin des autres.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
7. J'essaie de résoudre mes problèmes moi-même plutôt que d'en discuter avec d'autres.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
8. Je trouve difficile de savoir ce qu'il faut faire dans les relations sociales.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
9. C'est le matin que je suis le(la) plus efficace.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
10. On me dit souvent que je vais trop loin quand j'expose mon point de vue dans une discussion.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
11. Cela ne m'ennuie pas trop d'être en retard à un rendez-vous fixé à un ami.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
12. Les relations sociales sont si difficiles que j'essaie de ne pas m'en soucier.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
13. Je ne ferais jamais rien d'illégal même si ce n'est pas très grave.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord

14. J'ai souvent du mal à juger si quelque chose est grossier ou familier.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
15. Dans une conversation, j'ai tendance à me centrer sur mes propres pensées plutôt que sur celles de mon interlocuteur.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
16. Je préfère les farces aux jeux de mots.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
17. Je vis au jour le jour.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
18. Quand j'étais enfant, j'aimais couper des vers de terre pour voir ce qui se passe.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
19. Je détecte rapidement si quelqu'un dit une chose qui en signifie une autre.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
20. J'ai de solides convictions sur la moralité.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
21. Je ne comprends pas comment des choses vexent tant certaines personnes.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
22. Il est pour moi facile de me mettre à la place de quelqu'un d'autre.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
23. Je pense que les bonnes manières sont la meilleure chose que des parents peuvent apprendre à leurs enfants.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
24. J'aime agir sur un coup de tête.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
25. Je prédis assez bien le ressenti des autres.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord

26. Dans un groupe, je repère facilement quand quelqu'un se sent gêné ou mal à l'aise.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
27. Si j'offense quelqu'un en parlant, j'estime que c'est son problème et pas le mien.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
28. Si quelqu'un me demandait mon avis sur sa coupe de cheveux, je répondrais honnêtement même si elle ne me plaît pas.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
29. Je ne comprends pas toujours pourquoi une personne peut être offensée par une remarque.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
30. On me dit souvent que je suis imprévisible.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
31. En groupe, j'aime être le centre d'intérêt.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
32. Voir quelqu'un pleurer ne me touche pas vraiment.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
33. J'adore parler politique.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
34. Je ne mâche pas mes mots, ce qui est souvent pris pour de la grossièreté même si ce n'est pas mon intention.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
35. En général, je comprends facilement les situations sociales.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
36. On me dit généralement que je comprends bien les sentiments et les pensées des autres.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
37. Quand je discute avec quelqu'un, j'essaie de parler de ses expériences plutôt que des miennes.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
38. Ça me bouleverse de voir un animal souffrant.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord

39. Je suis capable de prendre des décisions sans être influencé(e) par les sentiments des autres.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
40. Je ne peux pas me détendre sans avoir fait tout ce que j'avais planifié pour la journée.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
41. Je remarque facilement si quelqu'un est intéressé ou ennuyé par ce que je dis.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
42. Lorsque je regarde le journal télévisé, je suis triste de voir des personnes qui souffrent.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
43. Mes amis me parlent généralement de leurs problèmes car ils disent que je suis très compréhensif(ve).	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
44. Je peux sentir quand je dérange les autres, même s'ils ne me le disent pas.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
45. Je commence souvent de nouveaux passe-temps qui m'ennuient vite et je passe à autre chose.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
46. Des fois, on me dit que j'exagère quand je charrie les gens.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
47. Je serais bien trop anxieux(se) de monter sur un manège de montagnes russes.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
48. On me dit souvent que je suis insensible même si je ne vois pas toujours pourquoi.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
49. Si je vois qu'il y a un nouveau venu dans un groupe de personnes, je crois que c'est à elles d'essayer de l'intégrer.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
50. D'habitude, je ne m'implique pas émotionnellement lorsque je regarde un film.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord

51. J'aime être très organisé(e) dans ma vie de tous les jours, et je fais souvent des listes de ce que j'ai à faire.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
52. Je peux me mettre à l'écoute du ressenti des autres rapidement et intuitivement.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
53. Je n'aime pas prendre de risques.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
54. Je peux facilement comprendre ce que quelqu'un veut dire.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
55. Je peux deviner si quelqu'un masque ses émotions.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
56. Je pèse toujours le pour et le contre avant de prendre une décision.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
57. Je n'essaie pas de déchiffrer de façon consciente les règles en jeu dans les situations sociales.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
58. Je suis bon(ne) pour prédire ce que quelqu'un va faire.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
59. J'ai tendance à m'impliquer émotionnellement dans les problèmes de mes amis.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord
60. Habituellement, je comprends le point de vue des autres même si je ne le partage pas.	tout à fait d'accord	plutôt d'accord	plutôt pas d'accord	pas du tout d'accord

Merci d'avoir rempli ce questionnaire.

© MRC-SBC/SJW – Version française par C. Besche-Richard, M. Olivier et B. Albert. Mars 2006.

ANNEXE 5 : NASA-TLX

Name	Task	Date

Exigence mentale Quel degré d'activité mentale était exigé pour réaliser la tâche ?

Très faible

Très élevé

Exigence physique Quel degré d'activité physique était exigé pour réaliser la tâche ?

Très faible

Très élevé

Exigence temporelle Quelle pression temporelle avec-vous ressentie pour réaliser la tâche ?

Très faible

Très élevé

Performance Avec quel succès pensez-vous avoir réalisé la tâche ?

Réussite

Echec

Effort Quel effort deviez-vous fournir pour accomplir la tâche ?

Très faible

Très élevé

Frustré Avez-vous ressenti, durant votre tâche, de l'insécurité, du découragement, de l'irritation, du stress ou de l'agacement ?

Très faible

Très élevé

ANNEXE 6 : Caractéristiques des groupes « test » vs « contre-mesure »

Tableau : Caractéristiques des deux groupes (Immersion vs Cuff) : mesures baseline (moyenne±ET) (taille, poids, indice de masse corporelle (IMC), consommation maximale d'oxygène (VO₂max), le rythme cardiaque au repos, la température corporelle ainsi que des mesures de pression artérielle (SBP/DBP).

	Age (y)	Taille (cm)	Poids (kg)	IMC (kg/m ²)	VO ₂ max (ml/min/kg)	Rythme cardiaque (bpm)	T (°C)	SBP (mmHg)	DBP (mmHg)
Immersion (n=9)	33.9±7.1	176±6	73.9±7.5	23.9±1.7	46.5±8.1	57±6	36.4±0.3	115±11	68±5
Cuffs (n=9)	34.1±3.7	180±4	74.3±8.8	22.7±1.8	46.9±5.8	58±8	36.4±0.5	117±10	68±9
unpaired T-test	p=0.93	p=0.08	p=0.91	p=0.16	p=0.91	p=0.6	p=0.71	p=0.78	p=0.92
All (n=18)	34.0±5.5	178±6	74.1±8.0	23.3±1.8	46.7±6.9	58±7	36.4±0.4	116±10	68±7

Ces mesures ont été effectuées par l'équipe médicale du MEDES en BDC-2 et montrent une absence de différence significative entre les deux groupes.

ANNEXE 7: Protocole Général d'Immersion sèche

Le protocole général d'immersion sèche (DI) a été mené selon la méthodologie détaillée de **De Abreu et al., 2017**. Deux participants, un issu du groupe *Immersion* et un issu du groupe *Cuff* ont subi une immersion sèche simultanément dans la même pièce, dans deux bains séparés (à l'exception de deux sujets qui n'avaient pas de partenaire).

Un bain est spécialement conçu pour accueillir un sujet. Il mesure 2,2 mètres de long, 1,1 mètres de large et 0,85 mètre de profondeur. Un tissu imperméable est fixé à un rebord en métal autour du bord externe du bain. La baignoire possède un plateau ascenseur intégré permettant d'abaisser et de soulever le sujet. Le participant est placé sur le tissu imperméable après que ce dernier ait été recouvert d'un drap de coton pour des raisons d'hygiène. Le plateau permet de descendre le sujet lentement dans l'eau et son corps est progressivement recouvert des plis du tissu ainsi que de l'eau qu'il contient. Le tissu est suffisamment mince pour permettre au sujet de sembler « librement suspendu » dans la masse d'eau, similairement à un manque total de soutien structurel. La profondeur d'immersion va jusqu'au cou (clavicules cachées) afin d'en maximiser les effets (Navasiolava et al., 2011).

La température thermoneutre de l'eau (de 32 à 34,5°C) a été maintenue en continu, elle peut être ajustée en fonction du confort à la demande du sujet, dans des limites strictes néanmoins (Kozlovskaja, 2008). La température de l'air est d'environ 24°C afin de maintenir l'équilibre thermique lorsque le sujet est soulevé du bain.

La période d'extinction a été fixée à 23h00 – 7h00. L'hygiène quotidienne, la pesée et certaines mesures spécifiques (IRM, biopsie) nécessitaient une extraction du bain. Durant ces périodes hors du bain, les sujets ont maintenu la position inclinée, tête vers le bas, de -6°. Le temps total de décubitus dorsal hors du bain pour les 120h d'immersion était de 9,7 +/- 1,3h. De DI-1 à DI-4, le temps hors du bain était de 1,1 +/- 0,6 h/jour. A DI-5, le temps hors du bain était de 5,3 +/- 1,1h, en raison de la biopsie musculaire et de l'IRM. Sinon, durant l'immersion sèche, les participants sont restés immergés en position couchée pour toutes les activités et ont été continuellement observés par vidéo-surveillance.

Le poids corporel, la pression artérielle, la fréquence cardiaque et la température corporelle tympanique ont été mesurées quotidiennement. La prise d'eau adéquate a été fixée à 35-60 ml/kg/jour tout au long du protocole. La composition du menu de chaque jour d'expérimentation était identique pour tous les participants et l'apport alimentaire a été personnalisé et contrôlé individuellement au cours de l'étude.

ANNEXE 8: Questionnaire de Saint Antoine

DATE :

NOM :

PRÉNOM :

QUESTIONNAIRE DOULEUR SAINT-ANTOINE (QDSA)

Décrivez la douleur telle que vous la ressentez d'habitude. Dans chaque groupe de mots, choisissez le plus exact. Donnez au qualificatif que vous avez choisi une note de 0 à 4

Cotation : 0=Absent/Pas du tout 1=Faible/Un peu 2=Modéré/Moyennement
3=Fort/Beaucoup 4=Extrêmement fort/Extrêmement

A	Battements	<input type="checkbox"/>
	Pulsations	<input type="checkbox"/>
	Élancements	<input type="checkbox"/>
	En éclairs	<input type="checkbox"/>
	Décharges électriques	<input type="checkbox"/>
	Coups de marteau	<input type="checkbox"/>

B	Rayonnante	<input type="checkbox"/>
	Irradiante	<input type="checkbox"/>

C	Piqûre	<input type="checkbox"/>
	Coupure	<input type="checkbox"/>
	Pénétrante	<input type="checkbox"/>
	Transperçante	<input type="checkbox"/>
Coups de poignard		<input type="checkbox"/>

D	Pincement	<input type="checkbox"/>
	Serrement	<input type="checkbox"/>
	Compression	<input type="checkbox"/>
	Écrasement	<input type="checkbox"/>
	En étau	<input type="checkbox"/>
Broiement		<input type="checkbox"/>

E	Tiraillement	<input type="checkbox"/>
	Étirement	<input type="checkbox"/>
	Distension	<input type="checkbox"/>
	Déchirure	<input type="checkbox"/>
	Torsion	<input type="checkbox"/>
	Arrachement	<input type="checkbox"/>

F	Chaleur	<input type="checkbox"/>
	Brûlure	<input type="checkbox"/>

G	Froid	<input type="checkbox"/>
	Glace	<input type="checkbox"/>

H	Picotements	<input type="checkbox"/>
	Fourmillements	<input type="checkbox"/>
	Démangeaisons	<input type="checkbox"/>

I	Engourdissement	<input type="checkbox"/>
	Lourdeur	<input type="checkbox"/>
	Sourde	<input type="checkbox"/>

A à I : critères sensoriels

J	Fatigante	<input type="checkbox"/>
	Énervante	<input type="checkbox"/>
	Éreintante	<input type="checkbox"/>

K	Nauséuse	<input type="checkbox"/>
	Suffocante	<input type="checkbox"/>
	Syncopale	<input type="checkbox"/>

L	Inquiétante	<input type="checkbox"/>
	Oppressante	<input type="checkbox"/>
	Angoissante	<input type="checkbox"/>

M	Harcelante	<input type="checkbox"/>
	Obsédante	<input type="checkbox"/>
	Cruelle	<input type="checkbox"/>
	Torturante	<input type="checkbox"/>
	Supplicante	<input type="checkbox"/>

N	Gênante	<input type="checkbox"/>
	Exaspérante	<input type="checkbox"/>
	Pénible	<input type="checkbox"/>
	Insupportable	<input type="checkbox"/>

O	Énervante	<input type="checkbox"/>
	Exaspérante	<input type="checkbox"/>
	Horripilante	<input type="checkbox"/>

P	Déprimante	<input type="checkbox"/>
	Suicidaire	<input type="checkbox"/>

TOTAL :

J à P : critères affectifs

Illustrant les différentes composantes de la douleur, le QDSA (version française du Mac Gill Pain Questionnaire-MPQ) permet essentiellement une évaluation qualitative de la douleur chronique, en particulier la douleur neuropathique.

Le QDSA nécessite, pour le patient douloureux un bon niveau de compréhension et un vocabulaire assez riche. Il en existe une version abrégée.



ANNEXE 9 : Questionnaire général d'état de santé

Sujet _____ Date ____/____/____ Jour (entourer) : BDC-
1_DI1_DI2_DI3_DI4_DI5_R+0

Questionnaire	Matin <input type="checkbox"/>	Soir <input type="checkbox"/>
---------------	--------------------------------	-------------------------------

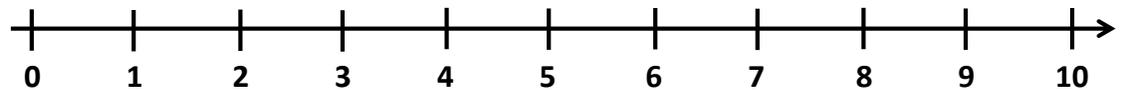
Inconfort global



Très confortable

Très inconfortable

Mal au dos



Pas mal du tout

Très mal

Sommeil



Pas dormi du tout

Très bien dormi

Inconfort au niveau de cuisses



Très confortable

Très inconfortable

Est-ce que vous avez:

- Maux de tête pulsatiles (0 à 5): ____
- Tête lourde (0 à 5): ____
- Congestion nasale (0 à 5): ____
- Sensations douloureuses en bougeant les yeux (0 à 5): ____
- Sensation du gonflement du visage (0 à 5): ____
- Voix enrouée (0 à 5): ____
- Diminution de l'ouïe ou de la vue (0 à 5): ____
- Nausées, vertiges, envie de vomir (0 à 5): ____