



Étude des effets de la représentation visuelle d'une sensation tactile sur la modulation de la perception douloureuse et de l'incarnation en réalité virtuelle.

Charles Hernoux

► To cite this version:

Charles Hernoux. Étude des effets de la représentation visuelle d'une sensation tactile sur la modulation de la perception douloureuse et de l'incarnation en réalité virtuelle.. Neurosciences [q-bio.NC]. Université Paris sciences et lettres, 2022. Français. NNT : 2022UPSLS009 . tel-03969205

HAL Id: tel-03969205

<https://pastel.hal.science/tel-03969205>

Submitted on 2 Feb 2023

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

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



THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à l'École supérieure de physique
et de chimie industrielles de la ville de Paris

**Étude des effets de la représentation visuelle d'une
sensation tactile sur la modulation de la perception
douloureuse et de l'incarnation en réalité virtuelle.**

Soutenue par

Charles HERNOUX

Le 18 janvier 2022

École doctorale n° 158

**Cerveau, cognition,
comportement**

Spécialité

Neurosciences

Composition du jury :

Isabelle, VIAUD-DELMON Directrice de recherche CNRS – IRCAM	<i>Présidente</i>
Alessandro, FARNE Directeur de recherche INSERM – CRNL	<i>Rapporteur</i>
Daniel, MESTRE Directeur de recherche CNRS – CRVM	<i>Rapporteur</i>
Marie-Hélène, FERRER Docteur IRBA – Ministère des armées	<i>Examinatrice</i>
Thierry, GALLOPIN Maître de conférences CNRS – ESPCI	<i>Directeur de thèse</i>
François, VIALATTE Maître de conférences	<i>Co-directeur de thèse</i>

*À ma famille,
et à Huguette, ma marraine*

Remerciements

Un travail de thèse de trois ans ne peut se réaliser sans le soutien de sa famille, sans le soutien de ses amis et sans le soutien de ses encadrants.

Je tiens, par ces quelques mots, à exprimer ici toute ma gratitude et mes remerciements à tous ceux qui m'ont accompagné dans ce magnifique projet.

Mes premiers remerciements iront tout naturellement aux personnes sans qui cette thèse n'aurait pas existé. Tout d'abord, je tiens sincèrement à te remercier William Eldin. Nous avons eu l'occasion de nous rencontrer par l'intermédiaire de Franck et le « courant est tout de suite passé entre nous ». Nous avons une vision commune de la science, de la recherche et une passion réelle pour le cerveau et ses capacités extraordinaires. Tu as accepté de mettre sur pied la première thèse CIFRE de XXII et l'aventure a ainsi pu commencer grâce à toi...

Je tiens également à remercier François Vialatte, mon codirecteur de thèse. Tu as su me faire confiance et tu as accepté que je rejoigne ton équipe.

Je tiens ensuite à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Thierry Gallopin. Thierry, tu as pris la lourde responsabilité de me reprendre sous ton aile lorsque François est parti. Tu ne me connaissais pas et tu as accepté malgré tout de m'encadrer pour que je termine ma thèse dans de bonnes conditions. Tu as appris à découvrir le sujet en même temps que moi, à dompter la douleur et à percevoir les capacités extraordinaires de la réalité virtuelle. Tu as toujours fait preuve de bienveillance et d'humour lors de nos conversations. Tes encouragements m'ont aidé à rebondir et trouver de nouvelles solutions lorsque les problèmes se succédaient dans ma thèse... Merci encore très sincèrement !

Je tiens tout particulièrement à remercier également Souheil Hanoune, mon encadrant scientifique de XXII. Souheil, nos conversations ont toujours été agréables, constructives, encourageantes et pleines d'humour pendant ces trois ans. Tu as, toi aussi, su me booster dans les moments critiques de la thèse et mettre à ma disposition toutes les ressources nécessaires pour m'aider et gagner du temps. Ton aide et tes conseils m'ont été très précieux. Merci pour tout !

Merci aussi à Karim Benchenane de m'avoir accueilli dans ton équipe après le départ de François. Tu m'as également aidé à élaborer la troisième étude et à avoir un autre regard sur les données obtenues.

Un grand merci également à Isabelle Rivals, statisticienne à l'ESPCI. Tu m'as énormément aidé cette année et j'ai pu faire d'énormes progrès en stats grâce à toi ! Tu as toujours été présentes pour répondre à mes questions (même basiques) avec beaucoup de pédagogie, de sympathie et de patience. Encore une fois, merci à toi !

Je remercie également l'ensemble des stagiaires qui ont pu participer de près ou de loin aux études de ma thèse. Elise, Loïs, Alix, David, Julien, merci à vous.

Mes prochains remerciements seront pour mes collègues qui sont devenus des amis avec le temps. Côté laboratoire, je commencerai par Rudy, mon binôme de travail. Je ne compte plus le nombre d'allers et retours que nous avons faits tous les deux entre ton bureau et le mien. Nous avons été dans des situations similaires depuis le début et nous avons su compter l'un sur l'autre pour avancer ! Tu m'as énormément aidé durant ma thèse et ton esprit critique et scientifique m'ont permis d'avoir un autre œil sur mes données. Tes « râleries », tes blagues, les bars ensemble me manqueront sincèrement !

Je ne peux pas évoquer le prénom de Rudy sans évoquer celui de Léa. Nos sorties, nos discussions sur tout et rien, les plans « foireux » de nos soirées, ton aide pour mes expériences m'ont permis d'avoir une vraie vie sociale en dehors de la thèse ! J'espère que notre amitié perdurera et que nous aurons enfin l'occasion de faire les Châteaux de la Loire en vélo... Merci aussi très sincèrement pour la relecture de ce manuscrit en un temps record... Je te dis à très vite pour de nouvelles aventures !

Le dernier membre des « Survivants » est Charles. Tu fais partie de notre quatuor avec Léa et Rudy et ma thèse n'aurait pas été pareil sans toi ! Tu as toujours été là pour répondre à mes questions, pour m'aider et me conseiller (notamment sur les CPP et les stats) et je t'en remercie sincèrement ! Tes discussions scientifiques, ton humour et ta rigueur font de toi un excellent médecin/chercheur/militaire ! J'espère que nous aurons l'occasion de nous retrouver de manière régulière après la thèse !

Je terminerai par remercier mes autres collègues du laboratoire. Je ne peux malheureusement pas vous remercier un par un, mais sachez que j'ai passé d'excellents moments avec vous tous,

tout au long de ces trois ans. Charles, Mathilde, Amina, Laure, Yasmine merci pour nos conversations et nos rires. Merci aussi à tous les autres membres du laboratoire avec qui j'ai partagé de très bons moments au labo ou en dehors du labo.

Côté entreprise, je tiens sincèrement à remercier Julie, Malick et Marine pour leur amitié, leur gentillesse et leur bonne humeur ! Je tiens aussi particulièrement à remercier Arno pour sa très grande aide et son implication dans le projet !

Je ne peux évidemment pas oublier de penser à mes amis de longues dates. Nous avons eu d'excellents moments ensemble et nous en aurons encore beaucoup d'autres ! Noémie, Laura blonde, Laura brune, Simon, Jérôme merci de faire partie de ma vie !

Mes derniers remerciements, mais les plus précieux à mon cœur, iront tout naturellement à mes parents et à mon frère. Je ne trouve pas de mots assez puissants pour exprimer tout l'amour que j'ai pour vous. Vous avez constamment été derrière moi pour m'encourager, me soutenir, m'aider, me conseiller mais aussi... me supporter. Vous êtes pour moi une source d'inspiration, de réconfort et de bonheur. Je vous aime du plus profond de mon cœur et vous dédie cette thèse.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	iv
Liste des abréviations	ix
1. Introduction.....	2
1.1. Avant-propos	2
1.2. Contexte du projet doctoral.....	5
1.3. Objectif du projet doctoral.....	6
1.4. État de l’art	7
1.4.1. La douleur	7
1.4.1.1. Brève histoire de la douleur.....	7
1.4.1.2. Un enjeu sociétal	8
1.4.1.3. Définition de la douleur	9
1.4.1.4. Épidémiologie de la douleur	11
1.4.1.5. Taxonomie et classification de la douleur.....	12
1.4.1.6. Les composantes de la douleur.....	13
1.4.1.7. Bases neurophysiologiques de la douleur.....	16
1.4.1.8. La matrice de la douleur	21
1.4.1.9. Les modulations neurophysiologiques de la douleur.....	22
1.4.1.10. La modulation exogène de la douleur	24
1.4.1.11. Représentation visuelle de la douleur	25
1.4.2. La réalité virtuelle.....	30
1.4.2.1. Définition	30
1.4.2.2. L’expérience utilisateur.....	31
1.4.2.3. L’incarnation	33
1.4.2.4. Les domaines d’application de la réalité virtuelle.....	36
2. Matériels et méthodes	42
2.1. Avant-propos	42

2.2.	Déroulement général des études.....	42
2.3.	Critères d'inclusion et d'exclusion.....	43
2.4.	Environnement virtuel	44
2.5.	Périphériques externes	45
2.5.1.	Stimulateur électrique.....	45
2.5.2.	Électrodes de stimulation.....	45
2.5.3.	Casque de réalité virtuelle.....	45
2.5.4.	Capteurs de mouvements	46
2.5.5.	Ordinateur	46
2.6.	Incarnation visuomotrice	46
2.7.	Évaluation des scores d'incarnation.....	47
2.8.	Représentation visuelle de la douleur.....	48
2.9.	Stimulations électriques.....	49
2.10.	Détermination du seuil douloureux	49
2.11.	Détermination du facteur de grossissement.....	50
2.12.	Ordre de passage des conditions	51
2.13.	Questionnaires.....	51
2.14.	Analyses statistiques.....	53
3.	Chapitre 1	56
3.1.	Introduction	56
3.2.	Stratégie expérimentale de l'étude 1.....	57
3.2.1.	Participants	57
3.2.2.	Protocole expérimental.....	57
3.3.	Résultats	59
3.3.1.	Impact de la représentation visuelle sur l'incarnation.....	59
3.3.1.1.	Vérification des prérequis.....	59
3.3.1.2.	Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle.....	60
3.3.1.3.	Influence de la synchronie et de l'asynchronie d'une représentation visuelle ..	63
3.3.1.4.	Influence de la localisation d'une représentation visuelle	65
3.3.2.	Impact de la représentation visuelle sur la douleur	67

3.3.2.1.	Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle.....	67
3.3.2.2.	Influence de la synchronie et de l'asynchronie d'une représentation visuelle .	70
3.3.2.3.	Influence de la localisation d'une représentation visuelle	75
3.4.	Discussion	77
3.4.1.	Influence de la présence d'une représentation visuelle sur l'incarnation.....	77
3.4.2.	Influence de la présence d'une représentation visuelle sur la douleur.....	80
3.4.3.	Influence de l'asynchronie d'une représentation visuelle sur l'incarnation.....	81
3.4.4.	Influence de l'asynchronie sur la douleur	82
4.	Chapitre 2	84
4.1.	Introduction	84
4.2.	Stratégie expérimentale de l'étude 2	85
4.2.1.	Participants	85
4.2.2.	Protocole expérimental	85
4.3.	Résultats	87
4.3.1.	Impact de la représentation visuelle sur l'incarnation	87
4.3.1.1.	Vérification des prérequis.....	87
4.3.1.2.	Influence du grossissement d'une représentation visuelle	88
4.3.1.3.	Influence de la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle.....	92
4.3.1.4.	Influence de la localisation d'une représentation visuelle grossissante.....	93
4.3.2.	Impact de la représentation visuelle sur la douleur	94
4.3.2.1.	Influence du grossissement d'une représentation visuelle	94
4.3.2.2.	Influence de la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle.....	102
4.3.2.3.	Influence de la localisation d'une représentation visuelle grossissante.....	107
4.4.	Discussion	114
4.4.1.	Influence du grossissement d'une représentation visuelle sur l'incarnation ..	114
4.4.2.	Influence d'une représentation visuelle sur la modulation objective de la douleur	115
4.4.3.	Influence d'une représentation visuelle sur la modulation subjective de la douleur	116
5.	Chapitre 3	118

5.1.	Introduction	118
5.2.	Stratégie expérimentale de l'étude 3	119
5.2.1.	Participants	119
5.2.2.	Protocole expérimental	119
5.2.3.	Évaluation des seuils douloureux.....	123
5.2.4.	Évaluation des intensités électriques.....	123
5.2.5.	Modifications de l'environnement virtuel	126
5.2.6.	Questionnaires.....	128
5.2.7.	Détermination du score de sortie de corps.....	130
5.3.	Résultats	132
5.3.1.	Impact de la représentation visuelle sur l'incarnation	132
5.3.1.1.	Vérifications des prérequis	132
5.3.1.2.	Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle.....	134
5.3.1.3.	Influence du point de vue	135
5.3.2.	Impact de la représentation visuelle sur la douleur	137
5.3.2.1.	Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle.....	137
5.3.2.2.	Influence du point de vue	138
5.3.3.	Impact de la représentation visuelle sur l'intensité des perceptions tactiles ressenties en réponse à des stimulations électriques non douloureuses	145
5.3.3.1.	Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle.....	145
5.3.3.2.	Influence du grossissement d'une représentation visuelle	149
5.3.3.3.	Influence de la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle.....	155
5.3.3.4.	Influence du point de vue	158
5.3.5.	Corrélations entre les niveaux de suggestibilité, les niveaux d'incarnation et les niveaux de sortie de corps.....	159
5.5.	Discussion	160
5.5.1.	Effets de la représentation visuelle sur l'incarnation, les seuils douloureux et les évaluations d'intensité des stimulations tactiles	160
5.5.2.	Effets des différents points de vue sur l'incarnation, les seuils douloureux et les évaluations d'intensité des stimulations tactiles	163
5.5.3.	Expérience de sortie de corps	165

6. Discussion générale	168
6.1. Résumé des résultats	168
6.2. Limites du projet doctoral.....	170
6.3. Perspectives du projet	173
Conclusion générale	175
Annexe 1 : Discours de suggestibilités.....	xi
Annexe 2 : Questionnaire de suggestibilité	xiii
Bibliographie	xix

Liste des abréviations

1PP	:	point de vue à la première personne
3PP	:	point de vue à la troisième personne
ACC	:	cortex cingulaire antérieur
ACP	:	Analyse en composantes principales
AMYG	:	amygdale
ASA	:	avec sphère asynchrone
ASS	:	avec sphère synchrone
BG	:	noyaux gris centraux
CL	:	noyau centro-latéral du thalamus
CP	:	cellule de projection
CPP	:	Comité de Protection des Personnes
EEG	:	Électroencéphalogramme
extra	:	extracorporelle
G1	:	grossissement de facteur 1x
G2	:	grossissement de facteur 2x
HT	:	hypothalamus
i	:	interneurone
IASP	:	International Association for the Study of Pain
IMC	:	indice de masse corporelle
intra	:	intracorporelle
L	:	large fibre nerveuse
M1	:	cortex moteur primaire
Mdvc	:	noyau dorsomédian (partie ventro-caudale du thalamus)
NHWS	:	National Health and Wellness Survey
OBE	:	Out-of-body experience (expérience de sortie de corps)
OMS	:	organisation mondiale de la santé
P	:	petite fibre nerveuse
PAG	:	noyau gris périaqueducal
PB	:	noyaux parabrachiaux
PCC	:	cortex cingulaire postérieur

PF	:	cortex préfrontal
PPC	:	cortex pariétal postérieur
RVM	:	moelle rostroventrale
S1	:	cortex somatosensoriel primaire
S2	:	cortex somatosensoriel secondaire
SG	:	sans grossissement
SMA	:	cortex moteur supplémentaire
SP	:	Seuil de perception
SS	:	sans sphère
TCC	:	thérapie cognitivo-comportementale
VMpo	:	noyau ventro-medio-postérieur du thalamus
VPI	:	noyau ventro-postéro-inférieur du thalamus
VPL	:	noyau ventro-postéro-latéral du thalamus

INTRODUCTION

1. Introduction

1.1. Avant-propos

Prenez quelques instants pour imaginer la situation suivante. Vous vous réveillez en pleine nuit avec une envie soudaine de vous désaltérer. De crainte de réveiller votre partenaire, vous décidez de vous lever silencieusement et de vous diriger à pas feutrés vers la cuisine sans allumer les lumières. Vous faites quelques pas dans votre chambre et, mal réveillé(e), vous oubliez la présence du carton entreposé près de votre porte que vous vous étiez pourtant juré(e) de ranger très prochainement...

Comme à votre habitude, et sans que vous perceviez l'ensemble des mécanismes mis en place par votre cerveau pour y parvenir, vos pieds s'animent dans une cohésion parfaite et votre corps avance de plus en plus vite en direction de la cuisine. À cet instant précis, vous n'avez aucune conscience de votre corps. Votre esprit est bien trop focalisé sur des choses plus importantes à votre survie : boire et... veiller à ne pas réveiller votre partenaire...

Votre pied droit est sur le point de passer le pas de la porte quand, tout à coup, votre petit orteil cogne violemment l'angle du carton. Une explosion de sensations surgit en vous et vous n'avez, à présent, conscience que d'une seule chose : l'existence de ce tout petit orteil localisé à l'extrémité de votre corps... Comme pour vous narguer de la situation et vous ridiculiser un peu plus, votre cerveau vous ordonne également de sauter sur place à cloche-pied, de tenir votre pied droit douloureux entre vos mains dans une position grotesque et de vociférer quelques-uns de vos jurons préférés. Évidemment, comme un malheur n'arrive jamais seul, votre partenaire se réveille, allume la lumière et observe béat(e), le spectacle s'offrant devant ses yeux...

Ce petit accident vous a fait prendre conscience de plusieurs choses. La première est l'omniprésence de votre corps dans votre vie et la relation particulière qu'il entretient avec votre esprit. L'omniprésence d'un corps qui peut d'ailleurs être facilement oubliée lorsque « tout va bien ». Qu'il s'agisse de vos gestes, de vos déplacements ou tout simplement de votre capacité à respirer, les capacités prodigieuses de votre corps sont si familières et simples, que votre esprit en inhibe leur présence pour se concentrer sur d'autres éléments. Il faut souvent être en « difficultés » pour reprendre pleinement conscience de ce corps. C'est par exemple le cas lorsque vous effectuez un mouvement complexe, lorsque vous êtes

enrhumé(e) et que votre nez est obstrué ou plus simplement lorsque vous souffrez de douleurs. Cette capacité à connaître son corps, ses possibilités, ses limites se regroupe sous le terme de conscience corporelle.

La seconde chose dont vous avez pris conscience avec ce petit incident est la capacité du corps à ressentir la douleur. Vous savez la localiser avec plus ou moins de précision mais aussi quantifier son intensité. Elle est subjective et personnelle et aussi surprenant que cela puisse être, c'est également un mécanisme époustouflant et indispensable à votre survie. C'est, en effet, un indicateur qui vous informe que l'intégrité de votre corps est en danger et qu'il est nécessaire de prendre des mesures pour retrouver un état normal. Dans le cas de notre exemple, l'objectif de la douleur était de vérifier que le petit orteil n'était ni écorché, ni fracturé, ni cassé.

À présent, continuez à imaginer la situation suivante. Vous vous asseyez sur le bord de votre lit, vous examinez de près votre orteil et découvrez avec étonnement qu'une sphère est apparue à l'endroit précis de la douleur. Elle est volumineuse, très vive et de couleur rouge. Vous décidez d'approcher votre main de la sphère et tentez de la prendre avec votre pouce et votre index disposés en pince. De manière surprenante, vous vous apercevez que vous pouvez la déplacer d'un endroit à l'autre de votre corps. Vous constatez également que la douleur se déplace, elle-aussi, au gré des mouvements de la sphère. Cette aptitude prodigieuse vous rend curieux(se) et vous donne envie de jouer avec. Vous resserrez alors votre pince pouce-index et constatez que la douleur diminue ou qu'au contraire elle augmente, lorsque vous desserrez la pince. Une idée vous traverse l'esprit et vous essayez littéralement d'arracher cette sphère de votre corps pour la jeter le plus loin possible de vous. Vous y parvenez avec une facilité déconcertante et remarquez de surcroît que la douleur a totalement disparu de votre corps !

Dans notre monde réel, cette situation se révèle être évidemment impossible à réaliser. Néanmoins, en se projetant dans un univers virtuel, cet événement est non seulement possible mais surtout facile à réaliser. C'est ce qu'offre aujourd'hui la réalité virtuelle. La capacité de créer une infinité de perspectives et de possibilités rapidement et « facilement ». Les seules limites étant celles de l'imagination.

L'objectif de ce travail de thèse est d'étudier la douleur en mettant l'accent sur la conscience corporelle et en utilisant la réalité virtuelle pour y parvenir. Plus précisément, nous nous sommes intéressés à étudier quel serait l'impact que peut avoir une représentation visuelle

douloureuse (telle qu'une sphère rouge) sur la douleur elle-même. Nous avons également profité de ces expérimentations pour apporter de plus amples connaissances sur les mécanismes d'incarnation mis en jeu lors d'expériences en réalité virtuelle. En effet, à l'heure où les prémices du Métaverse¹ viennent d'apparaître, ces notions d'incarnation et de conscience corporelle en réalité virtuelle deviennent des enjeux technologiques indispensables à comprendre et à maîtriser.

Nous espérons donc que ces modestes travaux de thèse permettront d'apporter une pierre à l'édifice quant à la compréhension de la douleur et de la conscience corporelle.

Pour terminer cet avant-propos, permettez-moi de conclure notre histoire. Vous veniez de sortir la sphère de votre corps et de découvrir que la douleur était totalement partie... Vous décidez à présent d'examiner votre petit orteil et découvrez qu'il bouge normalement et qu'aucune plaie n'est apparente. À présent, rassuré(e), vous partez boire un verre d'eau pour éteindre votre soif et vous remettre de vos émotions avant de revenir vous coucher...

¹ Le Métavers est un monde virtuel.

1.2. Contexte du projet doctoral

Le travail de cette thèse s'inscrit dans un partenariat tripartite entre l'entreprise XXII, le laboratoire Plasticité du cerveau de l'ESPCI et le doctorant.

En 2017, par un heureux concours de circonstances, j'ai eu le plaisir de rencontrer William Eldin, CEO de l'entreprise XXII et nous avons décidé de mettre sur pied la première thèse CIFRE de l'entreprise.

XXII, est une entreprise française, fondée en 2015 et initialement dédiée à la réalité virtuelle. Peu à peu, l'entreprise s'est intéressée à l'intelligence artificielle avant d'y consacrer pleinement son activité en 2021. Aujourd'hui spécialisée dans la vision par ordinateur, elle est composée de plus de 50 collaborateurs avec pour seul mot d'ordre : « augmenter l'humain et ses sens ».

Le projet a été écrit en collaboration avec l'équipe « Interface cerveau machine » du laboratoire de recherche en neurosciences « plasticité du cerveau » à l'ESPCI Paris-PSL. François Vialatte, alors maître de conférences en 2017, accepte de participer à l'élaboration de ce projet de thèse et de l'encadrer.

En octobre 2018, mon projet doctoral commence et a pour objectif de créer un système de neurofeedback en réalité virtuelle. Mon directeur de thèse, François Vialatte a malheureusement été dans l'obligation de dissoudre son équipe de recherche dont je faisais partie afin de pouvoir créer son entreprise. Mon projet de thèse a donc dû être remanié en fin de première année sur un sujet mêlant douleur, conscience corporelle et réalité virtuelle. François Vialatte a proposé à Thierry Gallopin, maître de conférences dans l'équipe « Memory Oscillations and Brain States » de prendre la codirection de ma thèse. J'ai donc rejoint son équipe dirigée par Karim Benchenane pour les deux années restantes.

Enfin, le projet doctoral, initialement prévu pour une durée de trois ans, devait prendre fin en octobre 2021 mais se trouve prolongé de trois mois suite aux conséquences de la crise sanitaire de la COVID-19.

1.3. Objectif du projet doctoral

Il existe aujourd'hui différents dispositifs de réalité virtuelle en vente libre pour diminuer la douleur des patients. Ces systèmes, développés par des entreprises privées telles que Bliss [1], DeepSEN [2], Healthy Mind [3], PainKillAR [4], etc., ont montré leur efficacité. Toutefois, ils se basent tous sur des mécanismes de distraction attentionnelle et s'avèrent donc avoir une efficacité limitée dans le temps. En effet, cette efficacité dépend du temps d'exposition des patients à l'environnement virtuel.

En ce qui nous concerne, nous souhaitons mettre en place un dispositif de diminution de la douleur plus durable et ayant une efficacité maintenue même après l'arrêt de l'exposition du patient dans l'environnement virtuel. Pour cela, nous nous sommes basés sur des mécanismes attentionnels impliqués dans la conscience corporelle en nous demandant quel serait l'effet d'une représentation visuelle de la douleur sur la douleur elle-même.

Pour répondre à cette question, nous avons mis en place trois études différentes permettant de connaître les effets d'une représentation visuelle 1) présente ou absente ; 2) synchrone ou asynchrone (à une stimulation électrique) ; 3) grossissante ou non ; 4) localisée dans le corps ou hors du corps mais aussi de connaître ses effets lorsqu'un participant était 5) dans ou hors de son corps.

La première partie de ce manuscrit abordera les connaissances générales relatives à la douleur et à la réalité virtuelle et passera en revue les travaux principaux de ces deux domaines. La seconde partie présentera la stratégie expérimentale générale mise en place dans nos trois expérimentations. La troisième partie, comprenant les chapitres 1 à 3, présentera et discutera des résultats obtenus dans nos différentes études. Enfin, la dernière partie, sera consacrée à la discussion générale et à la conclusion des éléments clés de nos recherches.

1.4. État de l'art

La première partie de ce manuscrit est consacrée à l'état de l'art. Nous nous intéresserons dans un premier temps à la douleur avant de nous intéresser à l'incarnation dans un second temps.

1.4.1. La douleur

1.4.1.1. Brève histoire de la douleur

Le Papyrus d'Ebers, daté du 16^{ème} siècle avant J.C., est l'un des plus anciens textes médicaux découvert en Égypte. Il rassemble 877 prescriptions médicales dans lesquelles sont décrites brièvement des maladies ou des formules magiques que prononçaient les chamans [5]. Ces derniers avaient pour rôle de purger et neutraliser le mauvais esprit d'une blessure douloureuse à l'aide de leurs médicaments ou de leurs pouvoirs spéciaux. Par exemple, pour soigner les maux de tête, le traitement consistait à expulser l'esprit offensant par les éternuements, la transpiration, la miction, les vomissements voire la trépanation. L'un des moyens les plus efficaces pour contrôler la douleur était aussi d'utiliser des poissons électriques du Nil sur les plaies. La stimulation électrique provoquait alors un soulagement de la douleur similaire aux mécanismes actuels de stimulation nerveuse électrique transcutanée (TENS) [6].

Vers la fin de l'Empire romain, de nombreux progrès ont été réalisés dans la compréhension de la douleur. Plusieurs méthodes thérapeutiques apparurent avec notamment l'utilisation de drogue comme l'opium, l'utilisation de la chaleur, du froid, des massages, la pratique d'exercices voire la chirurgie par trépanation. Les poissons électriques ont également été utilisés par les grecs pour traiter les douleurs liées à l'arthrite et aux maux de tête [6].

Au Moyen-âge la douleur était considérée comme une punition divine suite à des péchés ou comme une preuve que la personne était possédée par des démons. Peu de traitements étaient donc mis en place pour soulager les patients [7].

Il fallut attendre le 19^{ème} siècle et plus précisément l'accouchement de la reine Victoria en 1847 pour que les chrétiens contemporains acceptent l'idée qu'il n'était pas hérétique de promouvoir l'accouchement sans douleur. Cela vint du fait que James Simpson administra du chloroforme à la reine durant l'accouchement de son huitième enfant, le prince Léopold [6].

Les guerres récentes ont également fortement contribué au développement de nouvelles techniques et procédures pour gérer les blessures et la douleur (mutilations, membres fantômes, gelures, etc.). Durant la Seconde Guerre mondiale, le chirurgien militaire John Bonica a reconnu l'insuffisance de la gestion de la douleur et a fortement contribué à son amélioration. Considéré comme le « père de la douleur », il développa une clinique à l'Université de Washington à Seattle et écrivit le livre « The Management of Pain » en 1953. Il contribua également fortement à la mise en place de la péridurale pour gérer la douleur du travail et de l'accouchement [6].

1.4.1.2. Un enjeu sociétal

La douleur impacte la vie personnelle de la personne (pour elle-même ou son entourage), sa vie professionnelle (pour elle-même ou son employeur) mais aussi la société d'une manière plus générale. En effet, en termes de coûts, les douleurs représentent un budget considérable puisque qu'elles prennent en compte à la fois les hospitalisations, les traitements médicamenteux, les traitements non médicamenteux, les examens complémentaires mais également les arrêts de travail.

Le vieillissement de la population, l'accroissement des maladies chroniques, la dégradation de la qualité de vie des patients et les problématiques de la prise en charge de la douleur sont autant de problématiques que les services publics doivent affronter. Dès lors, le ministère de la santé a accentué son action pour lutter contre la douleur et des réglementations spécifiques ont ainsi été mises en place dès 1991.

De ce fait, de 1998 à 2000, apparaît le premier plan douleur. Les objectifs étaient de prendre en compte la demande du patient, de développer la lutte contre la douleur dans des structures multidisciplinaires et de former et informer les professionnels de santé [8]. Bien que certains résultats aient été constatés, les mesures prises se sont révélées être malheureusement insuffisantes.

Ainsi, un deuxième plan a été mis en place entre 2002 et 2005. De multiples avancées ont été réalisées avec notamment la création de 96 structures de lutte contre la douleur chronique. Ces structures étaient toutefois peu sollicitées par les patients et peu proposées par les médecins libéraux. Les délais pour une première consultation s'avéraient être, de plus, particulièrement longs. De manière plus générale, ce plan quadriennal mettait l'accent sur

trois priorités : la douleur engendrée par les soins et la chirurgie ; la douleur chronique et la douleur des enfants ; et de nouveau, la formation des professionnels de santé. Parmi les avancées majeures de ce nouveau plan douleur, deux principales lois sont à retenir. La première est celle du 4 mars 2002 qui reconnaît officiellement la douleur comme un « droit fondamental de toute personne » [9] et la seconde est celle du 9 août 2004 qui fait de la lutte contre la douleur une priorité de santé publique [10].

Plus récemment, un troisième plan national est apparu entre 2006 et 2010 avec notamment pour ambition « la structuration de la filière de soin ; l'amélioration de la prise en charge des douleurs des populations les plus vulnérables notamment des enfants et des adolescents, des personnes polyhandicapées, des personnes âgées et en fin de vie ; la formation initiale et continue des professionnels de santé ; une meilleure utilisation des traitements médicamenteux et des méthodes non pharmacologiques » [11].

1.4.1.3. Définition de la douleur

L'association internationale pour l'étude de la douleur (ou IASP pour International Association for the Study of Pain) est une association internationale constituée le 9 mai 1974 et qui rassemble aujourd'hui plus de 7 000 membres dans plus de 130 pays [12]. Elle comprend des scientifiques, des chercheurs, des cliniciens, des prestataires de soins de santé et des décideurs politiques. C'est la plus grande association multidisciplinaire dans le domaine de la santé et elle est reconnue comme une autorité mondiale de premier plan sur la douleur. Sa mission est de soutenir et stimuler la recherche, l'éducation et le traitement clinique de toutes les affections douloureuses et d'en diffuser les connaissances à travers le monde.

L'IASP a défini en 1979 la douleur comme « une expérience sensorielle et émotionnelle désagréable associée à une lésion tissulaire réelle ou potentielle ou décrite dans ces termes »[13].

Cette définition a largement été acceptée par les professionnels de la santé et les chercheurs dans le domaine de la douleur pendant de nombreuses années. Elle a ainsi été adoptée par de multiples organisations professionnelles, gouvernementales et non gouvernementales et adoptée par l'organisation mondiale de la santé (OMS) en 1986.

Toutefois, estimant que les connaissances sur la douleur avaient nettement progressé depuis 1979, l'IASP a rassemblé en 2018, 18 experts afin d'en réévaluer sa définition. Après deux

années d'étude, de concertations et de nombreuses délibérations, et sur la base de l'opinion majoritaire, le groupe de travail a publié ses recommandations sur son site internet et a sollicité l'avis du public. Au terme de ces travaux, il a été proposé que la définition de la douleur soit révisée et que les notes d'accompagnement soient mises à jour avec une liste à puces comprenant les étymologies comme présenté ci-dessous [14] :

« Douleur : Une expérience sensorielle et émotionnelle désagréable associée à, ou ressemblant à celle associée à, une lésion tissulaire réelle ou potentielle.

Notes² :

- La douleur est toujours une expérience subjective qui est influencée à des degrés divers par des facteurs biologiques, psychologiques et sociaux.
- La douleur et la nociception sont des phénomènes différents : l'expérience de la douleur ne se réduit pas à l'activité des voies sensorielles.
- À travers leurs expériences de vie, les individus apprennent le concept de la douleur et ses applications.
- Le rapport d'une personne sur une expérience douloureuse doit être accepté comme tel et respecté.
- Bien que la douleur joue généralement un rôle adaptatif, elle peut avoir des effets néfastes sur la fonction et le bien-être social et psychologique.
- La description verbale n'est qu'un comportement parmi d'autres pour exprimer la douleur ; l'incapacité de communiquer n'exclut pas la possibilité qu'un humain ou un animal non humain ressente de la douleur.

Étymologie : moyen anglais, de l'anglo-français peine, du latin poena (peine, punition), à son tour du grec poinē (paiement, peine, récompense). »

² Aucune traduction française officielle n'a été proposée. La traduction personnelle de la définition, des notes et de l'étymologie a été réalisée à partir de la version originale anglaise.

1.4.1.4. Épidémiologie de la douleur

Il est toujours intéressant de s'intéresser à l'épidémiologie d'une maladie ou, dans le cas présent, de la douleur afin de se rendre compte de la portée de celle-ci et de l'importance des recherches qui lui sont consacrées.

Bien que la douleur soit un symptôme fréquent, il est très difficile d'obtenir un consensus concernant sa prévalence et son incidence. Les résultats sont peu nombreux, variés et difficilement comparables étant donné que les méthodologies employées, les critères de sélection et le type de population sont très différents [15].

La National Health and Wellness Survey (NHWS) a réalisé entre mars et mai 2010 une enquête sur internet afin d'évaluer la prévalence de la douleur en France, au Royaume-Uni, en Espagne, en Allemagne et en Italie. 49,7 millions d'habitants de ces 5 pays ont signalé des douleurs au cours du mois précédent l'étude et parmi eux, 11,2 millions ont signalé une douleur intense, 29,4 millions une douleur modérée et 9,0 millions une douleur légère. Au vu de ces chiffres, la prévalence de la douleur quotidienne européenne était estimée à 8,85%. Cette étude a également mis en évidence que les personnes les plus concernées par les douleurs sont les femmes, plutôt âgées, souffrant de troubles musculosquelettiques, ayant un niveau de formation plus faible et possédant moins de revenus. La douleur serait également plus présente chez les personnes ayant une comorbidité et ayant des antécédents personnels et familiaux. En outre, les données ont montré que plus l'intensité de la douleur était élevée et plus ces facteurs étaient fréquents et intenses [16].

Selon une étude commandée par Sanofi en 2018, 1500 français ont été interrogés par Internet via l'Access Panel Ipsos. 46% d'entre eux ont déclaré « souffrir en silence », c'est-à-dire avec une ou des douleurs sans prise en charge adaptée. 42% d'entre eux souffraient de douleurs aiguës et 58% de douleurs chroniques. Elle concernait aussi bien les hommes (44%) que les femmes (56%) et aussi bien les jeunes (34% d'entre eux avaient moins de 35 ans) que les plus âgés (24% d'entre eux avaient plus de 60 ans) [17].

1.4.1.5. Taxonomie et classification de la douleur

Afin de mieux gérer la prise en charge des patients, il est primordial de pouvoir classer la douleur. Il n'existe toutefois pas un, mais plusieurs types de classement (par exemple : en fonction de la maladie, de l'anatomie, de la gravité, de la durée ou encore de l'étiologie) [18].

Selon la localisation anatomique

Dans le cas de la localisation anatomique, les syndromes douloureux sont classés par localisation corporelle. Il est ainsi possible de parler de douleurs pelviennes, lombalgiques ou encore de maux de tête pour les regrouper par même région.

De manière plus générale, il est courant de se référer au schéma corporel en parlant de douleurs musculosquelettiques, neurologiques ou vasculaires.

Selon la durée

La douleur peut avoir une durée variable selon le type de lésion. Elle peut être en effet plus ou moins longue (de quelques heures à quelques semaines) lorsqu'elle concerne des lésions tissulaires ou des inflammations. On parle alors de douleur aiguë quelle que soit l'intensité qui en résulte.

Les douleurs longues, quant à elles, ont une durée de 3 mois à quelques années et sont appelées chroniques. C'est par exemple le cas avec les membres fantômes, le syndrome douloureux régional complexe ou encore les maux de dos.

La Haute Autorité de Santé définit d'ailleurs la douleur chronique comme « un syndrome multidimensionnel exprimé par la personne qui en est atteinte. Il y a douleur chronique, quelles que soient sa topographie et son intensité, lorsque la douleur présente plusieurs des caractéristiques suivantes :

- Persistance ou récurrence, sur une durée au-delà de ce qui est habituel pour la cause initiale présumée et notamment si la douleur évolue depuis plus de 3 mois ;
- Réponse insuffisante au traitement ;
- Détérioration significative et progressive capacités fonctionnelles et relationnelles du patient dans ses activités de la vie journalière, au domicile comme à l'école ou au travail.

Elle peut être accompagnée :

- De manifestations psychopathologiques ;
- D'une demande insistante par le patient de recours à des médicaments ou à des procédures médicales souvent invasives (alors même qu'il déclare leur inefficacité à soulager) ;
- D'une difficulté du patient à s'adapter à la situation. » [8]

Autres classements

La douleur peut également être classée selon l'étiologie en regroupant différents diagnostics disparates dans des catégories plus générales (par exemple : douleurs nociceptives, neuropathiques et psychogènes) ou selon le système corporel (par exemple : douleurs myofaciales, rhumatismales, causalgiques, neurologiques ou vasculaires).

De manière unidimensionnelle, elle peut aussi être classée selon son intensité par le rapport subjectif des patients (0 étant l'absence de douleur et 10 la pire douleur qu'on puisse imaginer). Les évaluations dépendent toutefois beaucoup de la manière dont les questions sont posées (« la douleur en ce moment », « au cours de la semaine dernière » « au repos » « en mouvement », etc.). Cette classification peut être utilisée pour les patients individuels mais moins pour des comparaisons entre groupes.

La douleur peut être classifiée en se basant sur le fonctionnement (par exemple : la déficience (insuffisance physique, physiologique ou mentale), les limitations d'activité et les restrictions des patients), le diagnostic, sur les mécanismes de la douleur ou encore en combinant différentes classifications (en se basant par exemple sur l'intensité et le fonctionnement) [18].

1.4.1.6. Les composantes de la douleur

La douleur est multidimensionnelle et identifiée classiquement par quatre composantes principales : sensitivo-discriminative, affectivo-émotionnelle, cognitive et comportementale [19].

La composante sensitivo-discriminative

La composante sensitivo-discriminative est définie par les caractéristiques de la douleur telles que sa qualité, son intensité, sa durée ou encore sa localisation. Son intensité peut être auto-évaluée par les patients à l'aide de différentes échelles de douleur telles que l'échelle visuelle analogique (EVA) [20], l'échelle d'évaluation numérique (qui semble présenter de meilleurs

résultats que l'EVA pour les patients atteints de douleurs chroniques [21] et les analphabètes [22]) ou encore les échelles de visage (FPS-R) pour les enfants [23]. Sa durée, quant à elle, permet de classer la douleur en aiguë ou chronique et permet donc une meilleure prise en charge des patients [24]. Concernant la localisation de la douleur, elle peut être précisée à l'aide de dessins. L'utilisation d'un tel outil permet d'identifier la distribution de la douleur et les caractéristiques des syndromes douloureux ressentis. Les patients sont ainsi invités à marquer les zones de douleur et à utiliser différentes nuances pour indiquer la qualité de la douleur (coups de couteau, fourmillements, crampes...) [25].

La composante affectivo-émotionnelle

La composante affectivo-émotionnelle se réfère aux aspects émotionnels. L'empathie, l'anxiété ou encore la dépression peuvent moduler la douleur.

De nombreuses études ont en effet montré le rôle de la dépression chez les patients souffrant de douleurs chroniques. La douleur affecte négativement la reconnaissance et le traitement de la dépression et à l'inverse, les états dépressifs entraînent plus de plaintes douloureuses. Cela peut s'expliquer par le fait que la douleur et la dépression partagent des mécanismes et voies biologiques communes, ce qui a des implications pour le traitement conjoint des symptômes [26]–[28].

De même, l'anxiété a des conséquences sur la douleur. Plusieurs études ont, en effet, montré que les patients très sensibles à l'anxiété étaient plus négativement affectés par leur expérience douloureuse. Ils présentaient également une plus grande perturbation cognitive, une plus grande anxiété en réponse à la douleur, une plus grande peur des conséquences négatives de la douleur ou encore une plus grande négativité de l'affect [29], [30].

Les émotions telles que la peur, la colère ou la tristesse sont des prédictors de la composante affective des patients souffrant de douleurs chroniques [31]–[33]. La peur serait même la composante centrale des douleurs aiguës et du maintien de la douleur chronique et des incapacités qui y sont associées [33]. En outre, un état émotionnel positif diminue la douleur alors qu'un état émotionnel négatif l'augmente [34].

L'empathie et la douleur activent des circuits neuronaux identiques. La douleur des autres provoque un « mimétisme empathique » chez l'observateur et active donc les mêmes zones cérébrales via les neurones miroirs [35]. L'empathie peut engendrer un comportement

prosocial et donc une motivation à s'occuper d'une personne souffrante et aurait donc un rôle fondamental dans les interactions sociales et la communication de la douleur avec les autres [36]. Pour toutes ces raisons, l'empathie est également un facteur modulant la douleur.

La composante cognitive

La composante cognitive implique les processus mentaux qui influencent la perception et les comportements des patients. Il s'agit par exemple des processus d'attention, de mémoire, de décisions (du comportement à adopter), de diversion ou encore d'anticipation.

Par exemple, l'attention peut réduire la douleur par un effet de distraction [37], [38]. Elle dépend des voies cortico-somatosensorielles et des pratiques telles que le yoga, la méditation les effets placebo, peuvent moduler l'attention [39], [40].

L'anticipation joue aussi un rôle fondamental dans la douleur [41]–[43]. Elle explique notamment l'efficacité de l'effet placebo dans la diminution douloureuse [44]. De même, l'attente d'un soulagement permet également d'activer les circuits opioïdes endogènes descendants et contribue alors à diminuer la douleur [45]. A l'inverse, l'attente d'un stimulus douloureux amplifie la douleur [46].

La composante comportementale

Enfin, la composante comportementale regroupe les manifestations (verbales ou non verbales) qui sont observées dans des situations douloureuses. Elles dépendent notamment de l'entourage, de l'environnement culturel ou familial, de l'âge et du sexe.

Par exemple, la perception douloureuse est perçue différemment entre les hommes et les femmes. Chez les femmes, les douleurs sont plus fréquentes, de plus longues durées [47] et sont susceptibles apparaître dans plusieurs régions du corps [48]. De même, elles semblent également plus sensibles à la douleur expérimentale [49]. Plusieurs raisons comportementales et biologiques peuvent expliquer ces différences. Les femmes seraient plus susceptibles de consulter un médecin [50] ou encore plus disposées à signaler la douleur que les hommes dans les enquêtes. L'influence des hormones serait également à prendre en considération. La proportion différente d'œstrogènes et de progestérones pourrait avoir une influence bien que les résultats ne fassent pas consensus dans la littérature [51], [52]. En

outre, certaines douleurs varient également au sein même du cycle menstruel chez les femmes [53].

L'âge est aussi un facteur modulant la douleur puisque les personnes âgées sont plus sujettes à la douleur que les jeunes personnes [54]. Elles sont également plus vulnérables aux impacts négatifs de la douleur et des événements associés à la douleur [55]. Ces différences s'expliquent par de nombreux changements anatomiques et fonctionnels en vieillissant qui entraînent une augmentation de la sensibilité à la douleur et une moins bonne tolérance. Par exemple, des lésions et une réduction des fibres myélinisées et non myélinisées s'observent au niveau des nerfs périphériques [56]. De même, le nombre et la taille des neurones sensoriels dans les ganglions de la racine dorsale augmentent au début de l'âge adulte avant de culminer à la quarantaine pour ensuite diminuer [57].

Enfin, la douleur peut dépendre également du contexte, du cadre familial et de l'entourage. En effet, une étude a, par exemple, montré que des soldats blessés ressentaient peu de douleur à la suite de blessures graves mais réagissaient fortement aux procédures douloureuses mineures lorsqu'ils rentraient chez eux [58]. Le cadre religieux peut également avoir des effets bénéfiques sur la diminution de la douleur. En effet, les patients qui se tournent vers la prière présentent une diminution de la douleur [7], [59].

1.4.1.7. Bases neurophysiologiques de la douleur

Dans le cadre de nos études, nous avons induit une stimulation douloureuse sur la peau et avons observé les conséquences comportementales. Il est indispensable de comprendre les mécanismes sous-jacents qui permettent d'entraîner, à partir d'une simple stimulation électrique, une réaction comportementale douloureuse de la part des participants.

Dans cette partie, nous présenterons brièvement le parcours emprunté par l'influx douloureux de la surface de la peau jusqu'aux différentes aires cérébrales impliquées et nous présenterons également deux mécanismes intrinsèques de modulation de la douleur.

Les voies de la douleur

La nociception est définie comme l'activité neuronale afférente transmettant des informations sensorielles provenant de stimuli douloureux [60]. Ainsi, un stimulus nociceptif

est transmis de la périphérie au système nerveux central par l'activation d'une chaîne de trois neurones comme présenté ci-après.

Le neurone nociceptif

Le premier neurone est aussi appelé neurone nociceptif. Il est la voie d'entrée du stimulus douloureux. Il est localisé au niveau de la peau, des muscles ou encore des articulations. Il est composé de quatre éléments : la terminaison périphérique (récepteur nociceptif) ; la fibre nerveuse ; le corps cellulaire et la terminaison centrale.

La terminaison périphérique reçoit le stimulus et traduit le signal nociceptif en impulsions électriques via des potentiels d'actions. La fibre nerveuse véhicule ces potentiels d'action le long de l'axone. Celui-ci peut être de type C, non myélinisé, ou de type A delta, finement myélinisé. Les caractéristiques de ces axones sont indiquées dans le **Tableau I**. La terminaison centrale, quant à elle, correspond à l'élément présynaptique du premier relais [61].

Tableau I – Caractéristiques des différentes fibres nerveuses (axones). Tiré de Perruchoud, 2017 [61].

Fibre	Information véhiculée	Gaine de myéline	Diamètre (micromètre)	Vitesse de conduction (m/s)
A-alpha	Proprioception	Myélinisée	13-20	80-120
A-bêta	Toucher	Myélinisée	6-12	35-90
A-delta	Douleur (mécanique et thermique)	Myélinisée	1-5	5-40
C	Douleur (mécanique, thermique et chimique)	Non myélinisée	0,2-1,5	0,5-2

Il existe de nombreux types de neurones nociceptifs qui dépendent de la nature du stimulus nociceptif. Ils peuvent ainsi être spécifiques à la chaleur, au froid, aux stimulations chimiques ou mécaniques.

Les nocicepteurs projettent leur axone dans les couches superficielles I et II de Rexed au niveau de la corne dorsale de la moelle épinière (Figure 1). Les fibres myélinisées, quant à elles, sont plus épaisses et pénètrent dans les couches plus profondes.

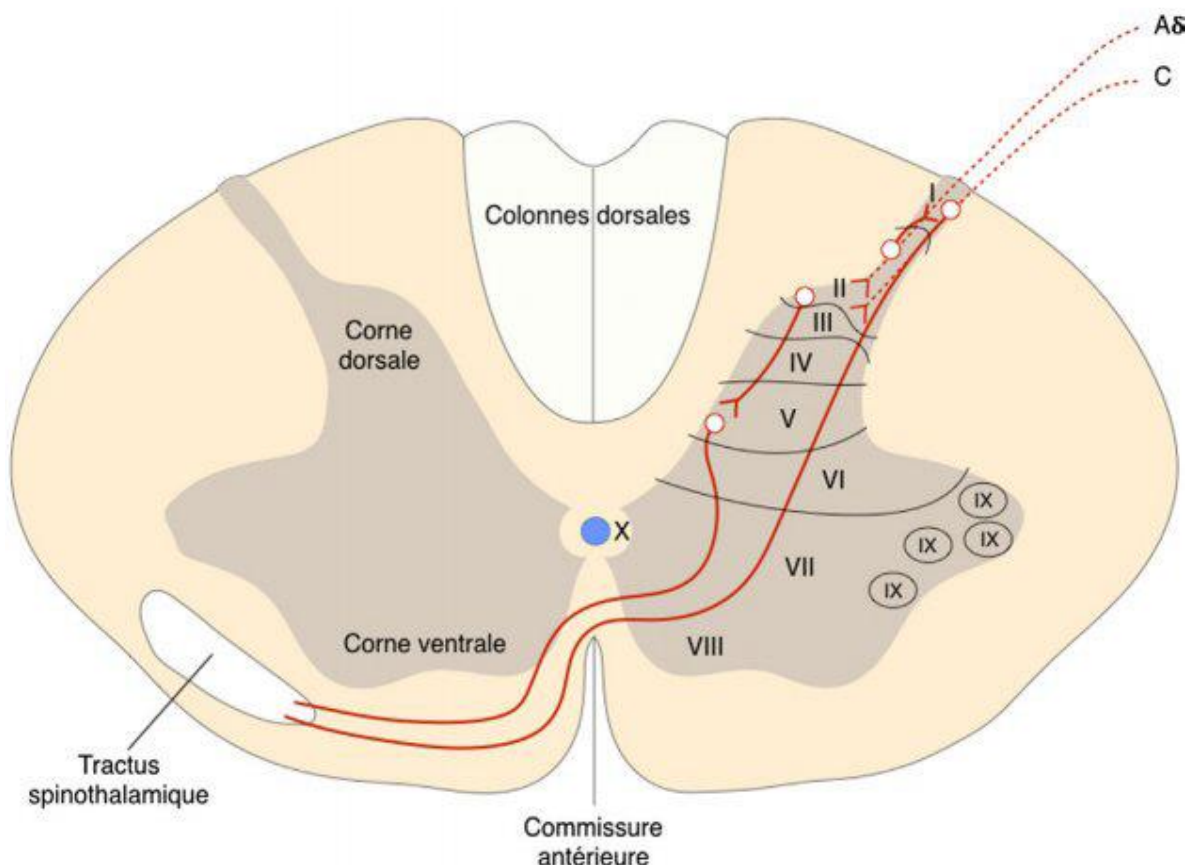


Figure 1 – Représentation schématique des projections des axones nociceptifs dans les couches de Rexed. Les axones des petites fibres myélinisés se projettent dans les couches superficielles. Tiré de [61].

Le faisceau spinothalamique

Le faisceau spinothalamique, appelé aussi deuxième neurone, débute au niveau de la corne dorsale de la moelle épinière, croise la ligne médiane et se prolonge dans le tractus ventrolatéral pour rejoindre le thalamus (**Figure 2**). Il est constitué de neurones nociceptifs dans les couches superficielles et de neurones mixtes dans les couches les plus profondes.

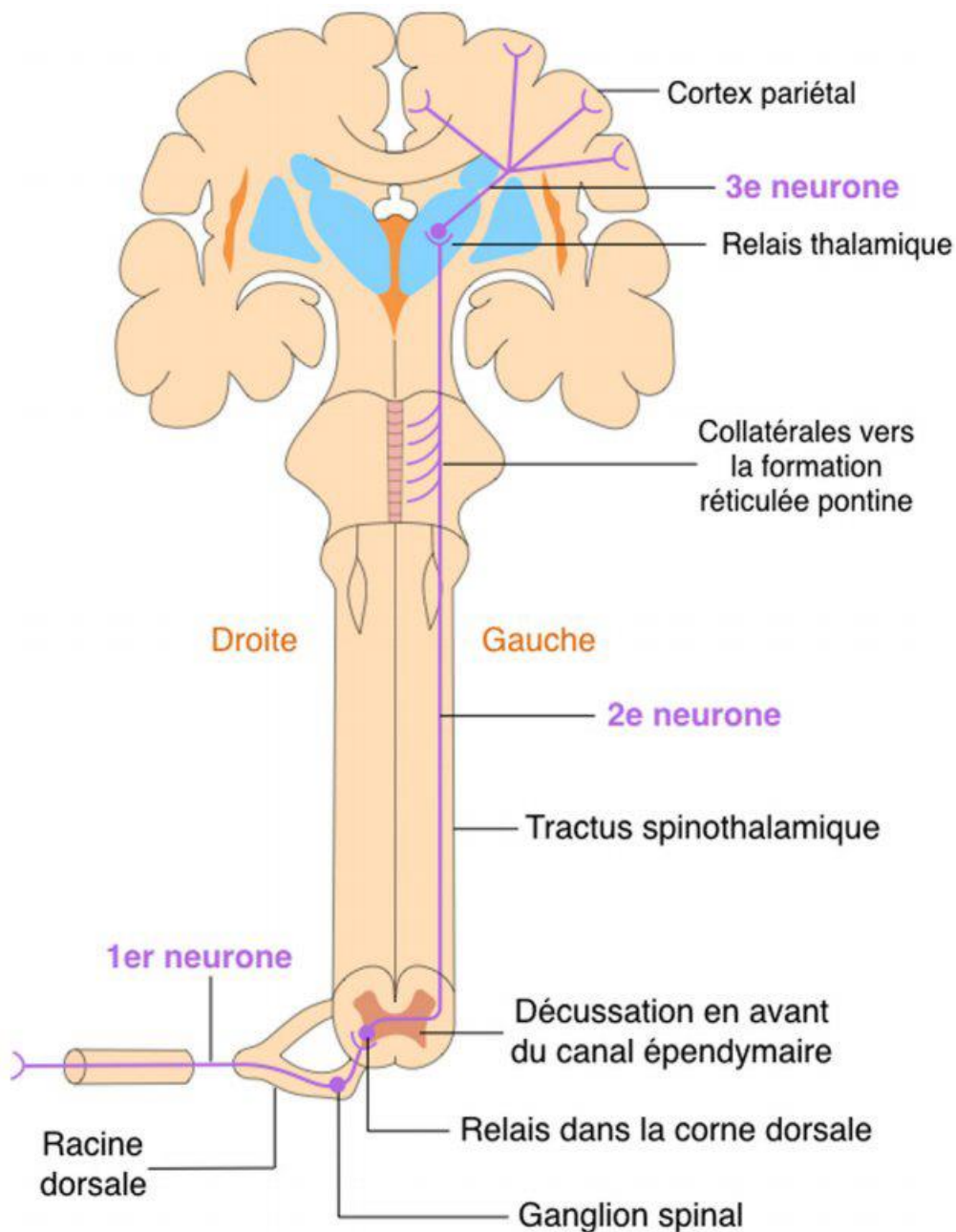


Figure 2 - Représentation schématique du faisceau spinothalamique. Le faisceau spinothalamique (deuxième neurone) débute au niveau de la corne dorsale et de la moelle épinière, croise la ligne médiane et se prolonge dans le tractus ventrolatéral pour rejoindre le thalamus. Tiré de [61].

L'organisation supraspinale

De manière générale, les projections supraspinales peuvent être catégorisées en deux voies : la voie spinothalamique latérale (qui informe le cerveau de l'intensité, la spatialité et la modalité du stimulus) et la voie spinothalamique médiale (qui est responsable de la composante émotionnelle de la douleur).

La voie spinothalamique latérale rejoint la voie lemniscale médiale et se projette sur le noyau ventro-postéro-latéral du thalamus (VPL) de manière somatotopique (chaque partie du corps est représentée dans une zone précise du cerveau de façon ordonnée). Ces noyaux sont des relais pour toutes les voies sensitives ayant des projections corticales. Ainsi, le thalamus agit comme un relais des voies de projections et comporte le corps du troisième neurone. Ces voies de projections sont les cortex somatosensoriels primaire et secondaire (Voie latérale de la **Figure 3**).

La voie spinothalamique médiale, quant à elle, se termine au niveau du cortex limbique, composé du cortex cingulaire antérieur et de l'insula rostrale (ces deux structures sont impliquées dans la composante émotionnelle de la douleur (Voie médiale de la **Figure 3**).

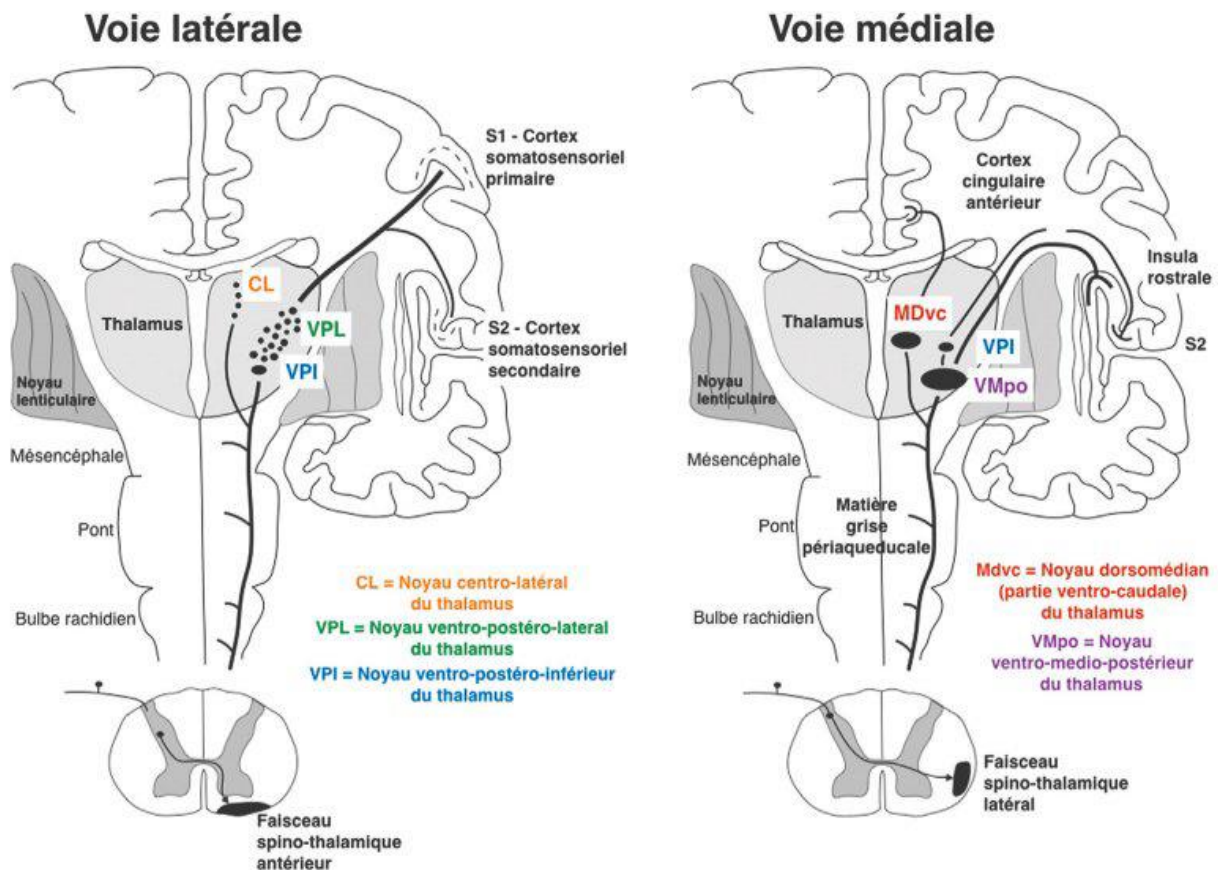


Figure 3 - Représentations schématiques de l'organisation supraspinale du faisceau spinothalamique. La voie spinothalamique rejoint la voie lemniscale et se projette sur le noyau ventro-postéro-latéral du thalamus (VPL) avant de rejoindre les cortex somatosensoriels primaire et secondaire. La voie spinothalamique médiale se termine au niveau du cortex cingulaire antérieur et de l'insula rostrale. Les abréviations sont indiquées sur le schéma. Tiré de [61].

1.4.1.8. La matrice de la douleur

La matrice de la douleur (ou « pain matrix » en anglais) est un vaste réseau de régions cérébrales impliquées dans la douleur. Elle comprend une quinzaine de zones tels que les cortex somatosensoriels primaire (S1) et secondaire (S2), insulaires (IC), cingulaires antérieur (ACC), préfrontal (PFC) et le thalamus (Th).

Au lieu de localiser un « centre de la douleur » singulier dans le cerveau, les études de neuroimagerie ont donc identifié un réseau de structures somatosensorielles (S1, S2, IC), limbiques (IC, ACC) et associatives (PFC) recevant des entrées parallèles de plusieurs voies nociceptives [62]. Les éléments qui la composent traitent également de divers aspects de la douleur tels que l'anticipation, la discrimination ou la perception affective.

Les régions corticales et sous-corticales impliquées dans la douleur sont illustrées dans la **Figure 4**.

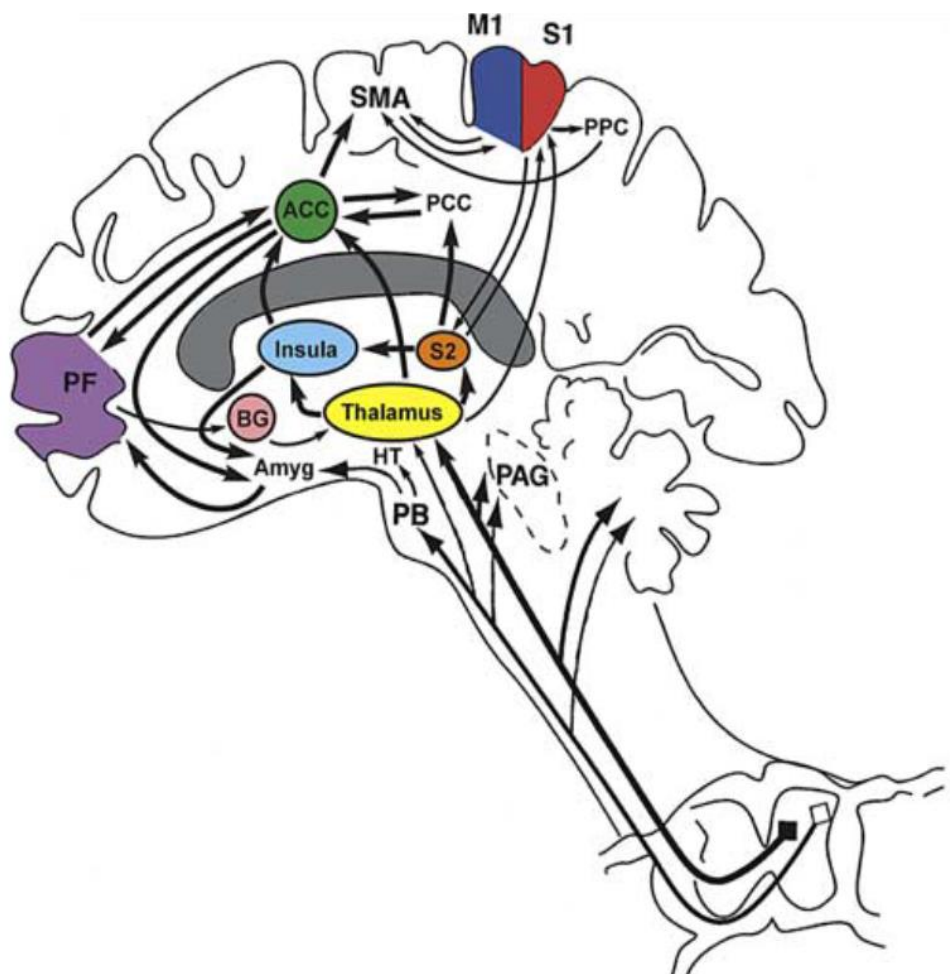


Figure 4 – Dessin schématique des régions corticales et sous-corticales impliquées dans la perception de la douleur, leurs interconnectivités et leurs voies ascendantes. Les emplacements des régions cérébrales qui sont

impliquées dans la douleur sont indiqués en couleurs. S1 : cortex somatosensoriel primaire (en rouge) ; S2 : cortex somatosensoriel secondaire (en orange) ; ACC : cortex cingulaire antérieur (en vert) ; insula (en bleu) ; thalamus (en jaune) ; PF : cortex préfrontal (en violet) ; M1 : cortex moteur primaire ; SMA : cortex moteur supplémentaire ; PPC : cortex pariétal postérieur ; PCC : cortex cingulaire postérieur ; BG : noyaux gris centraux (en rose) ; HT : hypothalamus ; AMYG : amygdale ; PB : noyaux parabrachiaux ; PAG ; noyau gris périaqueducal. Tiré de Apkarian et al., 2005 [62].

1.4.1.9. Les modulations neurophysiologiques de la douleur

La douleur peut être modulée par des systèmes neurophysiologiques endogènes. Elle peut agir comme un mécanisme de survie par exemple lorsque la fuite est nécessaire malgré la gravité et l'intensité douloureuse d'une blessure. Elle peut également permettre un dépassement de soi dans le cadre de compétitions sportives par exemple où les sportifs parviennent à poursuivre leur activité malgré la douleur ressentie.

Bien que non entièrement élucidés, plusieurs mécanismes neurophysiologiques semblent agir pour moduler la douleur tels que la théorie du portillon et l'inhibition descendante.

La théorie du portillon

Melzack et Wall ont proposé en 1965 la théorie du portillon (ou « Gate Control Theory of Pain » en anglais) qui a révolutionné la recherche sur la douleur [63]. Elle décrit le blocage de l'information nociceptive par un stimulus non nociceptif au niveau de la moelle épinière (autrement dit, entre le neurone périphérique et le neurone central) comme schématisé dans la **Figure 5**. Cette inhibition aurait lieu au niveau du neurone central et se ferait par des interneurons inhibiteurs de la corne dorsale.

En d'autres termes, les influx nociceptifs, sensitifs et inhibiteurs arrivent simultanément au niveau de la corne postérieure de la moelle épinière. L'ensemble de ces influx agirait comme un portillon qui laisserait passer de façon plus ou moins importante les informations. Plus le portillon est ouvert, plus les influx nociceptifs peuvent passer et plus la douleur augmente, et inversement. Cette théorie explique notamment les phénomènes de distraction permettant de réduire la douleur ou encore l'utilisation de la neurostimulation électrique transcutanée (TENS) qui sature les informations sensorielles et limite le passage des influx nociceptifs.

Cette théorie a permis de réunifier les théories de l'intensité (les informations douloureuses et non douloureuses suivent les mêmes voies mais avec des intensités différentes) et de la spécificité (les informations douloureuses et non douloureuses suivent des voies séparées).

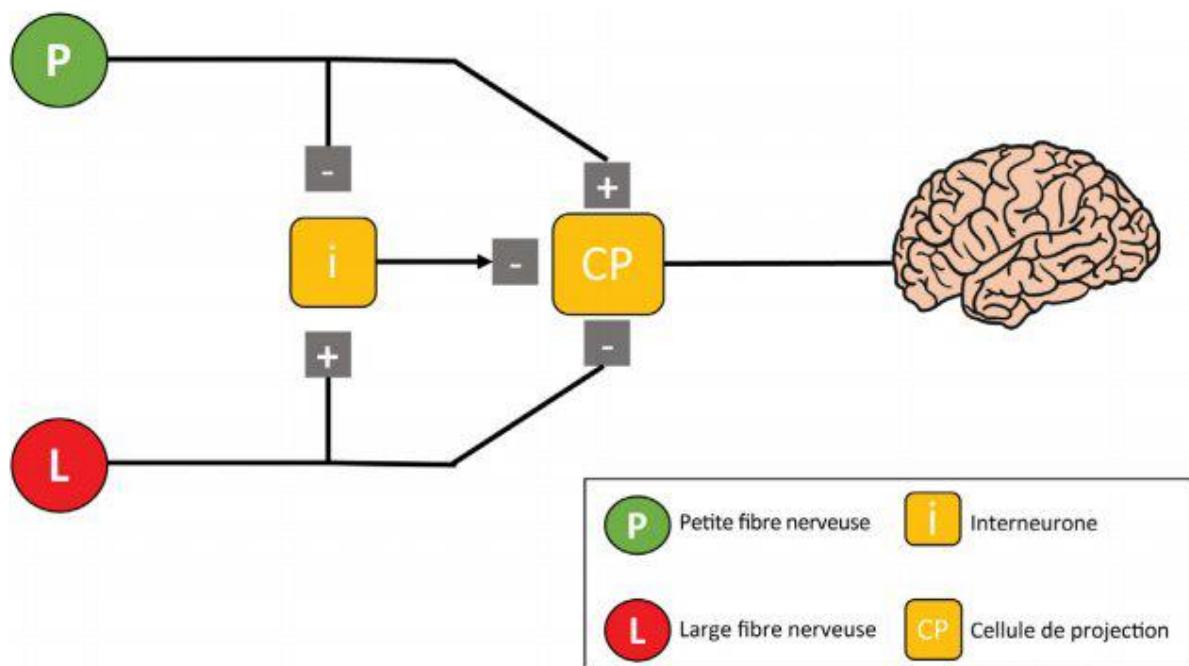


Figure 5 – La théorie du portillon. La théorie propose que les synapses des grandes fibres (fibres A notés L sur le schéma) et des petites fibres (fibres C notés P sur le schéma) se rejoignent au niveau de l'interneurone (i) et des cellules de projection centrale (ou cellules de transmission centrale, CP). L'effet inhibiteur exercé par l'interneurone sur les terminaisons des fibres afférentes primaires au niveau des cellules de projection est augmenté par l'activité dans les grandes fibres et diminué par l'activité des petites fibres. Tiré de [61].

L'inhibition descendante

Il existe des voies descendantes qui inhibent la douleur en utilisant des neurotransmetteurs (sérotonine, noradrénaline, dopamine et les opiacés endogènes). Elles trouvent leurs origines dans différentes structures telles que la substance grise périaqueducale (PAG), la moelle rostroventrale (RVM), le locus coeruleus, le gyrus cingulaire antérieur, l'amygdale et l'hypothalamus.

Ce contrôle descendant est régi par deux systèmes. Le premier est le système médian PAG-RVM qui agit principalement sur les influx nociceptifs provenant des fibres C. Au niveau de la moelle rostroventrale, les cellules ON/OFF qui y sont présentes modulent la douleur (les cellules ON entraînent une suractivation de la douleur alors que les cellules OFF entraînent une diminution de la douleur). Le second est le système latéral qui implique le noyau réticulaire dorsal et la moelle ventrolatérale. Lorsque ces voies sont activées, elles peuvent inhiber la douleur [64].

1.4.1.10. La modulation exogène de la douleur

Dans cette partie, nous présenterons quelques exemples efficaces de solutions non médicamenteuses pour lutter contre la douleur.

La gestion des douleurs est une préoccupation centrale dans le cadre des maladies et de nombreuses solutions existent. Bien que les solutions médicamenteuses soient principalement utilisées pour gérer la douleur, elles ne sont pas sans danger. En effet, elles peuvent entraîner de nombreux effets secondaires, des dépendances, des surconsommations et leurs efficacités tendent à diminuer sur le long terme. Pour éviter ces complications, de nouvelles thérapies telles que l'hypnose, la méditation, la musicothérapie ou même l'utilisation de massages sont apparues et ont prouvé leurs efficacités.

L'hypnose peut avoir un effet analgésique sur la douleur. Une méta-analyse a montré que sur 85 études expérimentales, l'efficacité de l'hypnose sur la douleur dépendait du niveau de suggestibilité des patients. Les auteurs ont, en effet, montré que la douleur diminuait de 42% chez les patients hautement suggestibles et de 29% sur les patients moyennement suggestibles. Toutefois, peu d'effets ont été montrés pour les patients peu suggestibles [65]. Une autre méta-analyse a confirmé la réduction de la douleur grâce à l'hypnose chez des patients atteints de douleurs chroniques [66]. Elle est facile à administrer et n'entraîne pas ou peu d'effets secondaires. Elle agit en entraînant une altération de l'activité dans les régions impliquées dans la douleur telles que les cortex cingulaires antérieur, préfrontal et insulaire [67].

La méditation a, elle aussi, montré des effets bénéfiques chez les patients. Ils avaient moins de symptômes dépressifs, de stress, d'images corporelles négatives, de troubles de l'humeur [39], [68], [69]. Ils acceptaient également mieux leur douleur, leur qualité de vie était améliorée [40], [70] et la consommation de médicaments avait également diminué [68].

La musicothérapie a également fait ses preuves et a montré des effets bénéfiques pour les patients douloureux [71]–[73]. En effet, elle modifie des processus affectifs, cognitifs et sensoriels et entraîne une diminution de la perception douloureuse par distraction, une altération de l'humeur, une amélioration du contrôle et une augmentation de la relaxation [71], [74]. Plusieurs études ont montré que l'utilisation de la musique entraînait également une diminution de la médication [75], [76].

L'utilisation de massages (ou massothérapie) peut également se révéler être une thérapie complémentaire efficace pour diminuer la douleur. Plusieurs méta-analyses ont montré une diminution significative de la douleur [77], [78]. Cette thérapie n'entraîne aucun effet secondaire et s'avère être simple à mettre en place. Elle permettrait même une diminution de l'anxiété, de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque [78] ainsi qu'une augmentation de la vigilance, une diminution de la dépression et une amélioration du système immunitaire [79]. La théorie du portillon (expliquée plus en détail dans la partie « **1.4.1.9. Les modulations neurophysiologiques de la douleur** ») semble expliquer les raisons pour lesquelles les massages entraîneraient une diminution de la douleur. En effet, la pression du massage entraînerait un surplus d'influx sensitifs qui « fermerait » le portillon et modulerait la transmission des stimuli douloureux.

Une méta-analyse récente de Cochrane s'est intéressée aux thérapies cognitivo-comportementales (TCC) et thérapies d'acceptation et d'engagement chez l'adulte. Les résultats ont montré un très faible bénéfice pour la douleur à la fin du traitement de la TCC (méta-analyse réalisée sur 3235 patients et regroupant 23 études) et aucune preuve d'efficacité n'a été montrée pour les thérapies d'acceptation et d'engagement [80].

Enfin, l'utilisation de la réalité virtuelle a également montré son efficacité pour diminuer la douleur. Ses effets seront présentés plus en détail dans la partie « **1.4.2.4. Les domaines d'application de la réalité virtuelle** ».

1.4.1.11. Représentation visuelle de la douleur

À notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à la représentation visuelle que se font les individus de la douleur. Il est pourtant courant de voir différentes représentations de la douleur sur internet, à la télévision ou encore sur les couvertures de livres.

Dans cette partie, nous avons décidé de présenter dans un premier temps quelques exemples qui montrent l'utilisation quotidienne de représentations visuelles pour illustrer la douleur. Dans un second temps, nous évoquerons les couleurs qui sont généralement associées à la douleur ainsi que leurs symboliques.

Exemples de représentations visuelles illustrant la douleur

Une simple recherche d'images sur internet est un moyen simple d'appréhender facilement la façon dont est représentée la douleur d'une manière générale. La **Figure 6** illustre ainsi les premiers résultats obtenus à partir du mot clé « douleur ». Sur les 19 images qui apparaissent, 10 illustrent la douleur à l'aide d'une représentation visuelle correspondant à un point rouge plus ou moins gros ayant un contour flou.

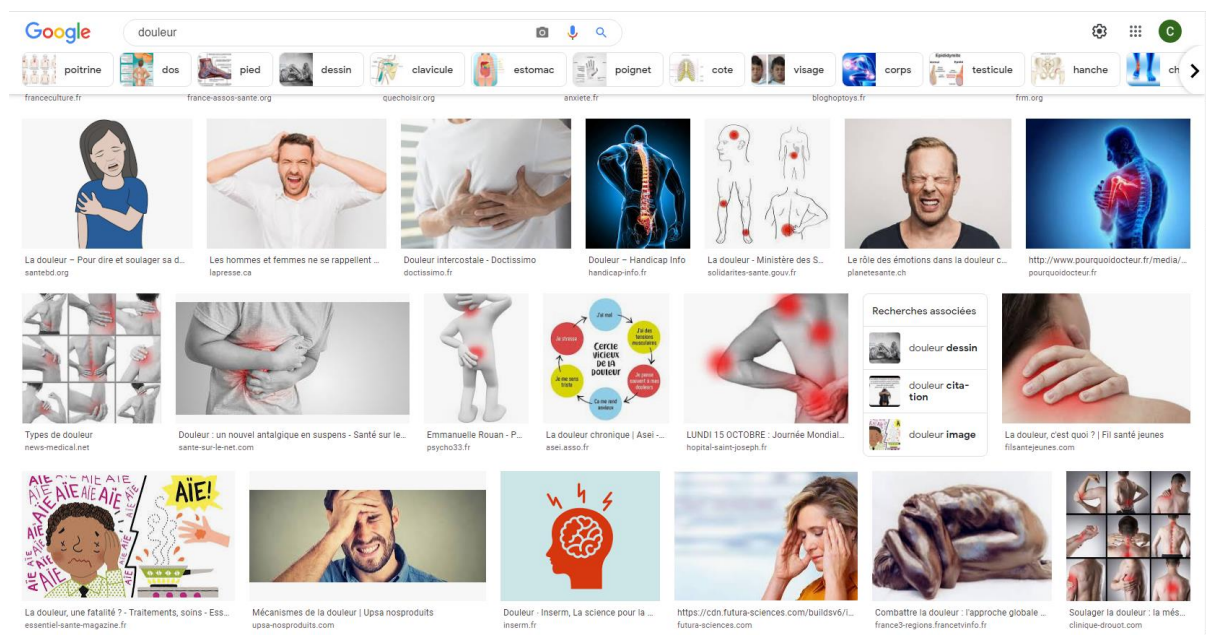


Figure 6 - Représentation visuelle de la douleur sur internet. La recherche du mot clé « douleur » sur le moteur de recherche Google montre que plus de la moitié des images présentées utilisent une représentation visuelle (un point rouge aux contours flous) pour indiquer l'emplacement de la douleur.

Les publicités télévisées ou diffusées en ligne faisant la promotion de médicaments agissant contre la douleur utilisent également une représentation visuelle de la douleur pour renforcer leur message. La **Figure 7** rassemble quatre publicités de médicaments contre la douleur pris à l'instant où la représentation visuelle de la douleur était illustrée pour indiquer son emplacement dans le corps. Sur chacune de ces images, la couleur utilisée est le rouge et les contours sont flous sur trois d'entre elles.

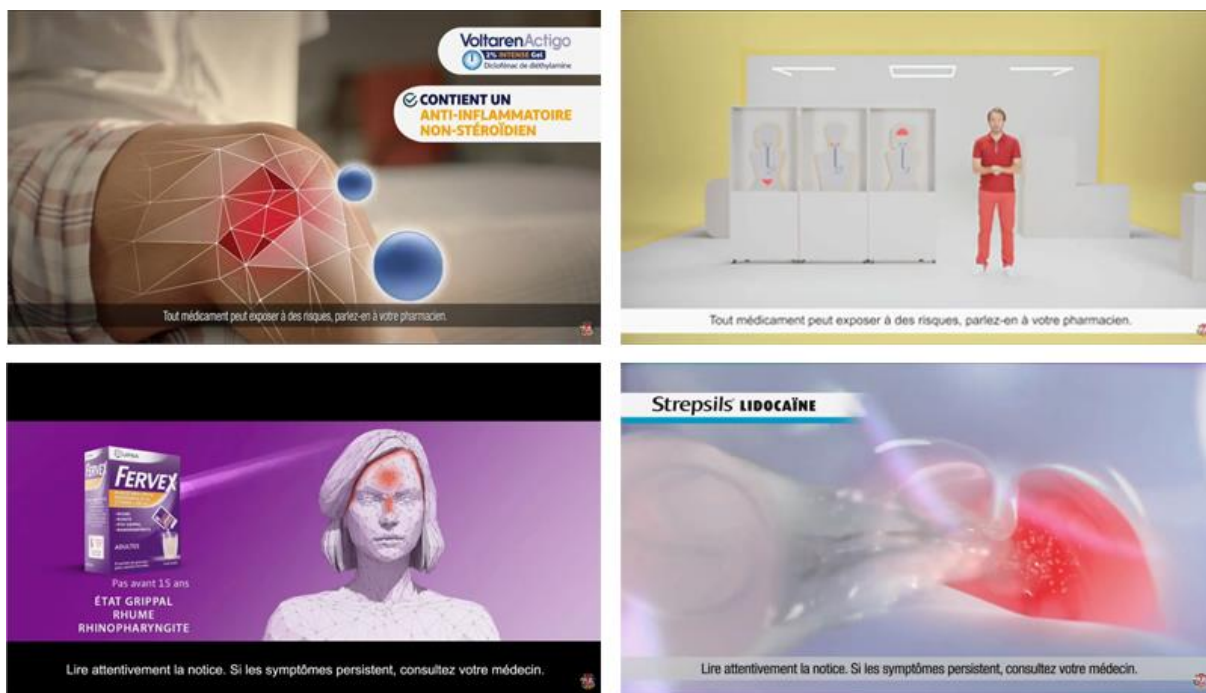


Figure 7 - Représentation visuelle de la douleur dans quatre publicités télévisées. L'ensemble de ces publicités utilisent un point rouge pour désigner l'emplacement de la douleur et trois sur quatre utilisent des contours flous. Images tirées des publicités de VoltarenActigo, Fervex, Strepsils et NurofenFlash [81]–[84].

Couleurs et douleurs

Plusieurs études se sont intéressées à la description et au dessin de l'expérience douloureuse chez les enfants. Le dessin permet, en effet, de faciliter la communication et leur prise en charge étant donné que la douleur est un concept subjectif et complexe pour eux. Elles ont montré que la douleur était principalement représentée par les couleurs rouges et noires.

En effet, dans leur étude, Unruh et al. [85] ont fait participer 109 enfants âgés de 5 à 18 ans (66 filles et 43 garçons) souffrant de migraines récurrentes ou de douleurs musculosquelettiques chroniques. Les enfants ont reçu deux feuilles de papier blanc vierge et 8 marqueurs colorés (noir, marron, bleu, violet, orange, rouge, jaune et vert). Sur la première feuille, les enfants devaient suivre l'instruction suivante : « S'il te plaît, dessine une photo de ta douleur. Si nous pouvions réellement voir ta douleur, à quoi ressemblerait-elle ? » alors que sur la seconde feuille, l'instruction donnée était « S'il te plaît, fais un dessin de toi lorsque tu souffres ». Les enfants étaient laissés seuls pour terminer leurs dessins. Le **Tableau II** montre la proportion des couleurs utilisées pour représenter la douleur mais aussi celles utilisées pour représenter un enfant qui souffre de douleurs. Les auteurs n'ont toutefois pas donné d'explications quant à l'utilisation des couleurs rouges et noires hormis le fait qu'il puisse s'agir

de la couleur préférée des enfants. En outre, les auteurs ont également montré que la douleur était fréquemment représentée par des formes abstraites tels que les lignes, des cercles, des flèches.

Tableau II – Couleurs dominantes utilisées dans les dessins d'enfants pour représenter la douleur.

* significativement plus fréquent ($\alpha=0,05$) que prévu par le hasard. Tiré et traduit de Unruh et al. [85].

Dessin	Couleur dominante (en pourcentage)								
	Rouge	Noir	Marron	Bleu	Orange	Violet	Vert	Jaune	Sans couleur
La douleur de l'enfant	22*	20*	16	14	8	7	5	3	5
Enfant ressentant de la douleur	13	25*	16	11	6	2	4	8	16

Savedra et al., [86] ont étudié aussi la représentation de la douleur chez des enfants de 9 à 12 ans en comparant les réponses d'enfants hospitalisés ($n=100$) aux réponses d'enfants non hospitalisés ($n=114$). A la question « quelle couleur est la douleur ? », le rouge a été cité 40 fois sur 100 pour les enfants hospitalisés contre 37 enfants sur 114 pour les enfants non-hospitalisés. Fait intéressant, les enfants hospitalisés ont déclaré plus fréquemment que la douleur n'avait pas de couleur (16/100) ou qu'ils ne connaissaient pas la couleur (14/100) par rapport à ceux qui n'étaient pas hospitalisés (respectivement 3/100 et 0/100). De même, les enfants hospitalisés ont moins sélectionné la couleur noire que les enfants non-hospitalisés (7/100 versus 18/114).

Pantoula et al., [87] se sont aussi intéressés à la symbolique de la douleur chez des adultes sains ($n=201$) et chez des patients souffrant de symptômes psychiatriques ($n=71$). Les participants étaient invités à remplir un questionnaire comprenant des questions sur les représentations sociales des symboles basées sur des méthodes d'association libre. Les résultats ont montré une préférence d'association de la douleur pour les couleurs noire, rouge et grise à la fois pour les participants sains et les patients.

La symbolique des couleurs

Jongudomkarn et al., [88] ont montré dans une autre étude que les couleurs les plus utilisées étaient le rouge, le noir, le jaune, le vert et le violet. Les explications parfois données par les enfants étaient « Quand j'ai mal, le visage devient rouge » ou « Quand j'ai mal, du sang est bloqué à cet endroit » bien que d'autres couleurs puissent apparaître chez certains enfants tels que le vert « mes jambes sont vertes parce que ma mère les masse pour atténuer la douleur », le violet « Mon bras s'est écrasé contre quelque chose, c'est devenu violet et ça fait mal » ou encore le jaune « Quand tu as mal, ton visage devient pâle et jaune ».

De même, plusieurs études ont montré de manière intéressante que les couleurs claires (ex : jaune ou bleu) sont associées à des émotions positives (ex : heureux ou fort) alors que les couleurs sombres sont associées à des émotions négatives (ex : tristesse ou colère) [89], [90]. La relation entre les couleurs et les émotions est également liée aux préférences des couleurs. Par exemple, le rouge est la couleur préférée des américains, la seconde préférée des libanais et n'est que la septième préférée des koweïtiens [91].

Le rouge est symboliquement connu comme une couleur dominante et dynamique avec un effet excitant et stimulant. Elle est connotée positivement et négativement en étant associée à des mots tels que fort, actif, passionné, chaleureux mais aussi agressif, sanglant, rageur et intense. Elle peut également être associée à l'amour et à la romance mais aussi au mal, à Satan ou au sang [92]. Une étude d'Elliot et Aarts a d'ailleurs indiqué que voir la couleur rouge juste avant ou pendant une réponse motrice augmentait la force et la vitesse de la réponse. Selon les auteurs, cela pourrait s'expliquer par une apparition possible de la peur [93]. Plusieurs études ont également montré que l'apparition d'un stimulus rouge avant ou pendant l'induction d'une douleur provoquait un jugement plus désagréable et plus intense de la part des participants [94], [95].

1.4.2. La réalité virtuelle

1.4.2.1. Définition

La définition technique proposée dans le « Traité de la Réalité virtuelle », 2006 [96, p. 1] est la suivante : « La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique (1) et des interfaces comportementales (2) en vue de simuler dans un monde virtuel (3) le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel (4) entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle (5) par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs. ».

Plusieurs précisions terminologiques ont été apportées par les auteurs afin de clarifier quelques termes de la définition.

1) La réalité virtuelle est en effet permise à l'aide de l'utilisation matérielle et logicielle de l'informatique afin de créer un environnement virtuel interactif et dynamique. Les entités (objets, personnages, etc.) présentes dans cet environnement sont animées en temps réel et suivent les lois de la physique (mécaniques, optiques, acoustiques, etc.) et les lois comportementales (psychologiques, sociales, affectives, etc.).

2) Les interfaces comportementales sont des interfaces matérielles de la réalité virtuelle. Elles peuvent être sensorielles (l'utilisateur est informé de l'évolution du monde virtuel via ses sens), motrices (l'ordinateur reçoit des informations sur les actions motrices de l'utilisateur via des interfaces motrices) et sensori-motrices (informent dans les deux sens : l'utilisateur et l'ordinateur).

3) L'environnement virtuel doit être interactif et s'adapter en temps réel aux actions de l'utilisateur.

4) L'interaction doit être adaptée au temps réel pour que l'utilisateur ne perçoivent pas de latence (décalage temporel) entre ses actions et ses retours sensoriels (visuels, tactiles, etc.).

5) L'immersion est pseudo-naturelle et ne peut pas être entièrement naturelle puisque des biais sensori-moteurs ont été créés dans l'environnement virtuel. Seules nos actions dans le monde réel sont naturelles.

Les auteurs précisent également que « l'interaction » et « l'immersion » sont les deux notions clés de la réalité virtuelle et ne peuvent être que partiellement réalisées étant donné qu'elles dépendent des avancées technologiques de la réalité virtuelle.

1.4.2.2. L'expérience utilisateur

Dans le cadre de nos recherches, l'expérience utilisateur devait être optimisée afin que l'environnement virtuel paraisse naturel et réel aux participants. Cette expérience utilisateur reposait notamment sur les notions d'immersion et de présence.

Immersion et présence

L'immersion et la présence sont deux notions souvent confondues voire perçues comme identiques. Nous en donnons les définitions dans un premier temps avant de présenter leurs caractéristiques propres dans un second temps.

Selon Slater, le terme « immersion » fait référence au niveau objectif de fidélité sensorielle qu'offre un système de réalité virtuelle. En d'autres termes, plus les modalités sensorielles (vue, ouïe, odorat, etc.) de l'environnement virtuel sont fidèles à la réalité et plus l'environnement est considéré comme immersif. Cette immersion peut être évaluée de manière objective. La « présence » est définie, quant à elle, comme une réaction humaine à l'immersion. Ainsi plusieurs utilisateurs peuvent ressentir un niveau de présence différent pour un même système immersif. A l'inverse, plusieurs utilisateurs peuvent ressentir un même niveau de présence pour différents systèmes immersifs. La présence est donc individuelle et est liée à l'expérience « d'être là » (connue aussi sous les termes « being there » en anglais) [97].

L'immersion et la présence sont donc théoriquement dissociables mais empiriquement fortement liées entre elles.

Facteurs d'immersion

Plusieurs facteurs peuvent permettre d'optimiser l'immersion des utilisateurs [98].

- 1) Le champ de vision : dépend de la taille du champ visuel (en degré d'angle visuel) ;
- 2) Le champ de regard : correspond à la taille totale du champ de vision (en degrés d'angle visuel) entourant l'utilisateur ;

- 3) La résolution de l’affichage ;
- 4) La stéréoscopie : l’affichage d’images différentes pour chaque œil pour fournir un repère de profondeur supplémentaire ;
- 5) Le rendu de l’image : recalculé en temps réel à partir des mouvements de la tête ;
- 6) Le réalisme de l’éclairage ;
- 7) La fréquence des images ;
- 8) La fréquence de rafraîchissement de l’écran.

Ces différents facteurs dépendent principalement du matériel et des logiciels utilisés.

Facteurs de présence

La notion de présence ne semble pas faire consensus dans la littérature. Plusieurs catégorisations ont été proposées afin d’expliquer la présence. Pour rappel, la présence fait référence au sentiment « d’être là » et peut aussi bien être ressentie en regardant la télévision, qu’en jouant à des jeux vidéo ou qu’en lisant un livre.

Lee a, d’ailleurs, différencié trois types de présence. La première est la présence physique et évoque la relation de l’utilisateur avec son environnement. La seconde est la présence sociale et évoque la relation de l’utilisateur avec les acteurs sociaux (avatars). La dernière est la présence de soi et évoque la relation d’un utilisateur avec son propre soi virtuel physique (présence d’un avatar) ou psychologique (absence d’avatar). L’auteur a également fait la différence entre l’expérience para-authentique et l’expérience artificielle. Dans la première, le participant garde un lien avec la réalité (exemples : télévision, visioconférence, téléopération...) alors que dans la seconde, aucun lien n’existe avec la réalité (exemples : lecture de non-fiction, interaction avec des agents virtuels, personnage virtuel choisi par le participant dans un jeu de rôle...) [99].

Comme pour l’immersion, plusieurs facteurs permettent d’optimiser la présence des utilisateurs dans un environnement virtuel [100].

- 1) Les paramètres d’affichage : la latence, le suivi de la tête, la stéréopsie et le champ de vision géométrique ont été associés et corrélés au niveau de la présence [101]–[103];

- 2) L'audio : le son a un impact très significatif sur la présence et notamment lorsque celui-ci est spatialisé [104] ;
- 3) L'haptique : les retours haptiques augmentent les niveaux de présence [105] ;
- 4) La représentation virtuelle du corps : les participants qui visualisent leur corps virtuel ont des niveaux d'agence plus élevés [106] ;
- 5) L'engagement du corps : les participants qui se déplacent en marchant dans un environnement virtuel ont des niveaux de présence plus élevés que des participants qui marchent sur place ayant eux-mêmes des niveaux plus élevés que les participants se déplaçant avec des boutons de souris [107]–[109];

De manière surprenante, le réalisme de l'environnement virtuel ne semble pas influencer les niveaux de présence [110].

1.4.2.3. L'incarnation

L'existence même d'un individu se définit par le fait d'être dans un corps, de le posséder et le contrôler. Cette expérience multisensorielle fait appel aux cinq sens communs (vue, ouïe, odorat, goût et toucher) mais aussi à la proprioception, la thermoception, l'équilibriception ou encore la nociception. Cette compréhension du corps, de l'espace qu'il occupe, des mouvements qu'il effectue et de toutes les actions qu'il réalise ou ressent est possible grâce à la conscience corporelle. Bien qu'aucune définition ne soit clairement établie, la conscience corporelle implique une concentration attentionnelle et une prise de conscience des sensations corporelles internes [111].

Toutefois, les recherches récentes ont montré que la conscience corporelle était malléable et que le cerveau pouvait facilement être dupé. La célèbre expérience de l'illusion de la main en caoutchouc par Botvinick et Cohen, en 1998, en est un exemple [112]. Le principe repose sur l'utilisation d'une main en caoutchouc positionnée à proximité de la main réelle d'un participant et dans une orientation cohérente à la réalité. Une stimulation tactile est appliquée à la fois sur la main en caoutchouc et sur la main réelle de manière synchrone. La main réelle du participant est cachée et seule la main en caoutchouc est visible. Après quelques minutes de stimulations visuotactiles synchrones, le participant ressent l'illusion que la main en caoutchouc est sa propre main. Cette illusion disparaît toutefois lorsque la fausse main ne

correspond pas à la posture de la vraie main, lorsqu'elle est caressée de manière asynchrone ou encore, lorsque la main humanoïde est remplacée par un objet contrôle [112]–[115].

Définition

L'utilisation de la réalité virtuelle a permis de faire de nombreuses avancées dans la recherche sur la conscience corporelle et notamment à travers les notions d'incarnation. Le terme d'incarnation peut être défini de différentes manières en fonction des disciplines (philosophie, robotique, informatique ou encore sciences cognitives).

Dans le cadre de ces travaux, nous garderons la définition donnée par Kilteni et al., sachant qu'elle fait notamment référence à l'incarnation dans les environnements virtuels. L'auteur donne donc la définition suivante : « Le sens de l'incarnation vers un corps B est le sens qui émerge lorsque les propriétés de B sont traitées comme si elles étaient les propriétés de son propre corps biologique. » [116].

L'auteur précise que la clarification conceptuelle reste encore vague dans cette définition étant donné que les propriétés et les expériences associées du corps biologique ne sont pas précisées. En effet, selon l'auteur toujours, « l'expérience quotidienne du corps biologique peut se manifester de trois manières principales. La première est que la représentation de soi dans un corps est déterminée et caractérisée par ses attributs spatiaux (le soi est localisé dans le corps). La seconde est que cette représentation spatiale est toujours auto-attribuée (le corps que l'on perçoit est son propre corps). La dernière est que le corps obéit aux intentions de soi-même (les actions du corps sont contrôlées par la personne elle-même). »

Dans les études relatives à l'incarnation, ces trois composantes sont retrouvées de manière récurrente sous les termes de « localisation de soi (ou auto-localisation) », « d'agentivité » et de « sentiment de propriété corporelle (ou de possession corporelle) ». Il est également possible parfois de retrouver une quatrième composante qui est l'« apparence extérieure » [117].

La possession corporelle (ou propriété corporelle)

La possession corporelle est définie comme étant la perception de l'utilisateur de posséder un corps virtuel [117].

Les études de la littérature montrent en effet qu'il est possible d'avoir l'illusion de s'approprier une partie d'un corps virtuel [112], [115], [118] ou la totalité d'un corps virtuel [119]–[121] comme étant le sien. L'impression visuelle d'avoir un corps suffit d'ailleurs souvent pour avoir le sentiment d'appartenance corporelle [122]–[124]. La possession corporelle serait également liée à l'apparence extérieure (visuelle) du corps virtuel [125] et à l'agentivité étant donné qu'elle serait plus robuste lorsque les participants sont acteurs de leurs mouvements et que ces mouvements sont synchrones [126]–[128].

L'agentivité (ou contrôle moteur)

L'agentivité fait référence au sentiment d'avoir « un contrôle moteur global, y compris l'expérience subjective de l'action, du contrôle, de l'intention, de la sélection motrice et de l'expérience consciente de la volonté » [129].

La seule présence d'un corps virtuel peut suffire à donner l'illusion d'agentivité des participants [123], [124], [130]. Plusieurs études montrent qu'il est possible d'obtenir des niveaux d'agentivité plus élevés lorsqu'il existe une stimulation visuomotrice, autrement dit, lorsque les mouvements de l'avatar sont synchrones aux mouvements réels du participant. Cependant, lorsque ces mouvements sont asynchrones, cette illusion diminuerait fortement voire disparaîtrait. L'agentivité est également supérieure lorsque les mouvements sont actifs plutôt que passifs étant donné que les participants initient eux-mêmes les mouvements [118], [131], [132]. Certains auteurs avancent également l'hypothèse qu'une stimulation visuomotrice augmenterait l'incarnation de manière plus importante qu'une stimulation visuotactile. En effet, la première intervient à la fois sur l'agentivité et la propriété corporelle alors que la seconde n'intervient que sur la propriété corporelle [128], [132].

Fait intéressant, d'autres études ont montré que l'agentivité serait moins élevée lorsque les mains virtuelles sont moins réalistes [125]. Cela signifie donc que l'apparence extérieure serait corrélée à l'agentivité.

La localisation de soi

La localisation est définie par le volume occupé dans l'espace, normalement localisé dans les limites corporelles [129].

L'emplacement du corps virtuel par rapport au corps réel affecte fortement les illusions d'incarnation. En effet, la localisation de soi semble même être la composante la plus importante pour avoir l'impression de s'incarner dans un corps virtuel. Cela peut s'expliquer par le fait que le cerveau aurait tendance à s'appuyer fortement sur une vie d'expériences consistant à voir le monde en vue à la première personne [114]. Maselli et Slater ont montré que l'utilisation d'un avatar colocalisé avec le corps réel du participant, placé d'un point de vue à la première personne et avec suivi des mouvements de la tête seulement était suffisant pour produire une illusion d'incarnation [133]. A l'inverse, une mauvaise localisation du corps inhibe la possession corporelle [126]. Dans certaines études, l'illusion peut toutefois persister même si le participant est déplacé de son avatar après une période de stimulation (expérience de sortie de corps) [134].

L'apparence extérieure

L'apparence visuelle s'avère jouer un rôle important dans l'illusion de l'incarnation. Bien que le faux corps n'ait pas besoin d'être réaliste pour que l'illusion se produise (mains d'apparence plastique ou membres allongés par exemple) [135]–[137], des niveaux de réalisme (texture et forme) plus élevés de la main artificielle améliorent l'illusion [138]. Lorsque le niveau de réalisme du corps virtuel n'est pas assez élevé et/ou lorsqu'il n'est pas colocalisé avec le corps réel du participant, une stimulation visuotactile ou visuomotrice congruente est requise pour évoquer l'illusion d'incarnation [133].

1.4.2.4. Les domaines d'application de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'éducation, la formation, l'architecture, le divertissement, l'immobilier, la santé ou encore la recherche.

La réalité virtuelle en neurosciences

La réalité virtuelle s'est également imposée comme un véritable outil de recherche, en particulier, dans les sciences cognitives. En effet, elle combine à la fois un haut degré de

contrôle et une bonne validité écologique. Elle permet l'ajout de capteurs physiologiques et le recueil de nombreuses données physiologiques. Elle est compatible avec les technologies d'imagerie non invasives et permet une répétabilité des essais, offrant aussi la possibilité d'une stimulation multimodale [139].

La réalité virtuelle a notamment montré son utilité dans la cognition spatiale et la navigation [140]–[142], les processus d'intégration multisensorielle [112], [119], [120], [143], les neurosciences sociales [108], [109], [144], les troubles psychiatriques [145], [146], la neuroréhabilitation [147], [148] ou encore la douleur (comme présenté ci-après).

La réalité virtuelle pour lutter contre la douleur

La réalité virtuelle a également été très utilisée pour la remédiation de la douleur. Une grande majorité des études se servent des environnements virtuels comme distracteurs (pour détourner l'attention de la douleur) alors qu'un nombre plus réduit d'études se consacre à la focalisation de l'attention des participants ou des patients sur leur corps (impliquant des processus de conscience corporelle).

L'utilisation de la distraction

De nombreuses études ont montré que l'utilisation de la distraction était efficace pour diminuer la douleur dans les douleurs expérimentales, chroniques ou aiguës.

Les premières études viennent de Hoffman et al., dans lesquelles les auteurs ont utilisé des environnements virtuels pour détourner l'attention de patients brûlés de leur douleur et les impliquer dans des tâches actives. Ainsi, les patients avaient la possibilité de prendre des objets dans une cuisine (assiette, théière, etc.) [149] ou de jeter des boules de neige dans un environnement glacial en présence d'icebergs, d'igloos ou de rivières gelées [150]. Ce dernier environnement virtuel, appelé « SnowWorld », a d'ailleurs été utilisé à de multiples reprises pour diminuer la douleur [151]–[155] et a été combiné à des techniques d'hypnose pour accentuer l'effet analgésique [156], [157]. D'autres environnements tels que « Virtual Gorilla » [158], « Spider World » [159] ou « Ice Cream Factory » [160] ont également été utilisés pour détourner l'attention des patients.

Toutefois, et dans le cadre de douleurs chroniques, plusieurs études ont montré que les patients estimaient une augmentation de la douleur pendant la distraction [161]–[163] ou une

augmentation de la douleur post-distraktion [164], [165]. De même, une étude a également montré que l'utilisation de la distraction dans les douleurs expérimentales semblait contre-productif étant donné qu'elle entraînait un ralentissement de la récupération de la douleur au froid alors qu'au contraire une simple focalisation de l'attention entraînait une récupération plus rapide [166].

Ainsi, bien que les méthodes de distraction semblent être efficaces, elles dépendent du contexte, de l'efficacité de la distraction ou encore de l'ajout de tâches cognitives attentionnelles. De même, elles sont efficaces seulement pendant la durée de la distraction et semblent donc moins appropriées dans le cas des douleurs chroniques.

L'utilisation des propriétés corporelles

Une autre stratégie semble montrer des effets intéressants sur la modulation de la douleur. En effet, plusieurs études ont montré qu'il était plus bénéfique de se concentrer sur les composantes sensorielles de la douleur que de tenter de la supprimer de la conscience [167]. De même, une autre étude a montré qu'un entraînement de discrimination sensorielle pouvait mener à une diminution de la douleur et réorganiser les zones de représentation du cortex liées à la douleur fantôme chez des patients amputés [168], [169].

La célèbre boîte à miroir de Ramachandran part du principe qu'un patient amputé positionne ses deux bras (amputé et valide) dans une boîte pourvue de deux trous. Celle-ci est ouverte sur le dessus et possède un miroir vertical. Le patient regarde légèrement de façon excentrée par le dessus et a l'impression qu'il possède de nouveau deux bras grâce à la réflexion du miroir et une diminution de la douleur apparaît [170]. Cette expérience a été reproduite en réalité virtuelle en positionnant des capteurs de mouvements sur le moignon et en représentant virtuellement le membre manquant. Les niveaux de douleur étaient également diminués dans ces études [171]–[173].

La manipulation de l'apparence d'un corps virtuel module également la perception douloureuse. Par exemple, dans leur étude, Weeth et al., ont montré que la protection perçue par un participant sur son bras virtuel pouvait moduler sa sensation douloureuse. En effet, le bras était soit non protégé (« bras nu »), soit neutre (« recouvert d'une manche de t-shirt »), soit protégé (« couvert d'une armure de fer »). Les participants ont ressenti une douleur plus

faible lorsque le bras était protégé par rapport aux conditions neutres ou sans protection [174].

D'autres études ont confirmé que la vision d'un corps virtuel par rapport à une absence de représentation du corps entraînait un effet analgésique [175]–[177] comme l'avait déjà rapporté Longo hors réalité virtuelle [178], [179].

Romano et al. ont aussi montré que l'augmentation de la taille d'un avatar engendrait des niveaux plus élevés de douleur [180]. Ces résultats sont d'ailleurs en accord avec les études hors réalité virtuelle qui ont montré que la distorsion du corps modulait la douleur [181]–[183].

Villiger et al. ont, quant à eux, utilisé la réalité virtuelle dans la neuroréadaptation afin que les patients observent leurs jambes virtuelles pendant leur entraînement intensif. Les résultats ont montré une augmentation des performances de réadaptation mais également une diminution de la douleur [184].

Lenggenhager et al. ont également montré qu'il était possible d'avoir l'impression de sortir de son corps lorsqu'il existe un conflit multisensoriel. Dans leur étude, les auteurs ont filmé le dos des participants portant un visiocasque et dont l'image était diffusée en temps réel (les participants observaient donc leur propre dos en vue à la troisième personne). Lorsqu'une stimulation tactile était appliquée sur le dos réel et observée en synchronie sur le dos virtuel dans le visiocasque, les participants avaient l'impression d'être localisés en dehors des frontières physiques de leur propre corps. Toutefois, lorsque la stimulation était asynchrone entre ce que ressentait le participant et la stimulation qu'il observait dans le visiocasque, l'illusion disparaissait [120]. Cette expérience a été reproduite en réalité virtuelle pour étudier la modulation de la douleur. Les résultats ont montré que les participants qui s'identifiaient à leur corps virtuel en vue à la troisième personne, obtenaient une augmentation des seuils de douleur et donc un effet analgésique [185]–[187].

Martini et al., ont montré que la transparence d'un corps virtuel modulait la douleur. En effet, un corps semi-transparent entraînait une sensibilité accrue à la douleur par rapport à un corps totalement transparent [188].

Enfin, dans une autre étude, les mêmes auteurs ont également montré que l'utilisation d'une représentation visuelle de la douleur pouvait moduler la douleur en fonction de sa couleur.

En effet, la couleur rouge engendrait une douleur plus importante qu'une couleur bleue lors de stimuli thermiques. De même, une représentation visuelle rouge qui apparaissait hors du bras (mais dans l'espace péripersonnel) engendrait des douleurs moins élevées qu'une apparition sur le bras [189].

MATÉRIELS ET MÉTHODES

2. Matériels et méthodes

2.1. Avant-propos

Nous avons ainsi élaboré trois protocoles expérimentaux différents permettant d'étudier les effets d'une représentation visuelle lorsqu'elle était présente ou absente, synchrone ou asynchrone à une stimulation tactile, grossissante ou non ou localisée dans ou hors du bras. De même, nous avons étudié les effets lorsque le point de vue de l'observateur était à la première personne et à la troisième personne.

Bien qu'étant un objectif secondaire, nous souhaitons également profiter de la mise en place de ces protocoles expérimentaux pour étudier l'effet de cette représentation visuelle sur les niveaux d'incarnation présentées dans ce manuscrit.

Cette partie « matériels et méthodes » regroupe l'ensemble des éléments communs aux trois études expérimentales.

Les spécificités propres à chaque étude seront détaillées plus précisément dans les parties dédiées à chacune d'elle.

2.2. Déroulement général des études

Les participants étaient invités, tout d'abord, à lire et à signer le dossier d'information et le formulaire de consentement. Par la suite, l'expérimentateur expliquait oralement le déroulement de l'étude et répondait aux éventuelles questions.

Le participant revêtait une blouse blanche jetable et la peau de son avant-bras était ensuite nettoyée avec de l'alcool à 70° avant d'y positionner deux électrodes de stimulation de surface. L

L'expérimentateur délivrait des stimulations électriques sur l'avant-bras des participants afin d'identifier leur seuil douloureux basal (cf. partie « **2.10. Détermination du seuil douloureux** » de ce chapitre pour plus d'informations). Cette étape permettait de confronter pour la première fois le participant aux stimulations électriques et de l'entraîner à déterminer son seuil douloureux.

Le casque de réalité virtuelle était ensuite placé sur la tête des participants et ajusté à leur convenance. Des capteurs de mouvements étaient également positionnés sur chaque main. Les participants devaient, par la suite, vérifier que les objets présents dans l'environnement virtuel étaient parfaitement colocalisés avec les objets réels présents dans la salle d'expérimentation.

Une première phase d'incarnation du participant dans son avatar était effectuée (cf. partie « **2.6. Incarnation visuomotrice** » de ce chapitre pour plus d'informations). À la fin de celle-ci, l'expérimentateur interrogeait le participant pour savoir s'il se sentait bien et s'il ne présentait aucun symptôme de cybercinétose (nausées ou sensations de vertiges). En cas de symptômes, le participant était invité à fermer les yeux et à retirer aussitôt le casque de réalité virtuelle avant d'être exclu de l'étude.

Les conditions expérimentales (spécifiques à chaque étude) étaient ensuite proposées aux participants dans un ordre randomisé afin d'obtenir leurs seuils douloureux. De plus, entre chaque condition, le participant répondait à un questionnaire d'incarnation (cf. partie « **2.13. Questionnaires** » de ce chapitre pour plus d'informations).

Une fois que les conditions expérimentales étaient terminées, l'expérimentateur désappareillait le participant et lui remettait une gratification avant de le laisser partir.

La durée totale de chaque étude était comprise entre 1h et 1h30.

2.3. Critères d'inclusion et d'exclusion

Les critères d'inclusion, de non-inclusion et d'exclusion retenus dans nos études expérimentales permettaient de garantir la sécurité des participants et la cohérence des résultats.

Les critères d'inclusion des participants étaient les suivants :

- Participants sains affiliés à un régime de sécurité sociale ou bénéficiaire d'un tel régime ;
- Participants âgés de 18 à 35 ans ;

- Participants ayant une vision normale (sans correction ou avec correction hormis le port de lunettes correctrices) ;
- Participants ne présentant pas une obésité (indice de masse corporelle (IMC) > 30 kg/m²) ;
- Participants comprenant et parlant parfaitement le français ;
- Participant ayant donné leur consentement libre et éclairé.

Les critères de non-inclusion étaient les suivants :

- Prise antérieure à 2 semaines de médicaments contre la douleur (ex : doliprane, ibuprofène...) ou d'anti-dépresseurs ;
- Prise antérieure à 2 mois de stupéfiants ;
- Femmes enceintes, femmes allaitantes ou parturientes ;
- Majeurs protégés ;
- Personnes privées de liberté.

Les critères d'exclusion retenus, quant à eux, étaient les suivants :

- Participants souhaitant arrêter l'expérimentation ;
- Participants sensibles à la cybercinétose (nausées causées par la réalité virtuelle) durant la phase d'habituation.

2.4. Environnement virtuel

Un environnement virtuel reproduisant la salle d'expérimentation à l'échelle 1 : 1 a été modélisé en 3D à l'aide du logiciel 3DSMax [190]. Les coloris des murs et des objets ont été respectés.

Une table et une chaise, modélisées à l'échelle 1 : 1, ont également été ajoutées dans l'environnement virtuel et ont été superposées à la présence réelle de la table et de la chaise

de la salle d'expérimentation. Des souris d'ordinateur ont également été ajoutées à la scène virtuelle et positionnées à des emplacements fixes sur la table afin de servir de support pour les mains des participants durant l'expérimentation.

L'avatar des participants était masculin ou féminin et portait une blouse blanche similaire à celle que le participant revêtait dans la réalité. L'objectif étant d'uniformiser l'apparence de l'avatar et du participant quel que soit les vêtements portés par celui-ci. Ses avant-bras étaient dénudés et la couleur de la peau de l'avatar était blanche.

Les participants étaient colocalisés avec leur avatar et voyaient la scène d'un point de vue à la première personne (1PP) excepté pour l'étude 3 où deux conditions expérimentales ont été effectuées en vue à la troisième personne (cf. partie « **Stratégie expérimentale** » du Chapitre 3 pour plus d'informations).

2.5. Périphériques externes

2.5.1. Stimulateur électrique

Un stimulateur électrique Energy Light de la société Micromed [191] et répondant aux normes CE a été utilisé dans l'ensemble des études expérimentales (**Figure 8A**). Le boîtier était alimenté par deux piles AAA et connecté d'un côté à l'ordinateur afin que celui-ci délivre les impulsions électriques et de l'autre côté aux électrodes de stimulation positionnées sur l'avant-bras du participant.

2.5.2. Électrodes de stimulation

Les électrodes de stimulation (Ag/AgCl) étaient à usage unique et leur dimension était de 15 x 20 mm. Elles ont été positionnées sur l'avant-bras du sujet après un nettoyage de la peau avec de l'alcool à 70°.

2.5.3. Casque de réalité virtuelle

Un casque HTC VIVE a été utilisé dans le cadre de nos études expérimentales. La résolution de l'écran était de 2160 x 1200 pixels (soit 1080 x 1200 pixels par œil) avec un taux de rafraîchissement de 90 Hz (soit 90 images par secondes). Le champ de vision était de 110° (**Figure 8B**).

2.5.4. Capteurs de mouvements

Le suivi des mouvements des mains a été effectué à l'aide de deux capteurs Vive Tracker 2.0 (un positionné sur chaque main). Une cinématique inverse a permis de calculer les mouvements des bras en temps réel à partir de l'emplacement des mains dans l'espace (**Figure 8C**).

2.5.5. Ordinateur

L'ordinateur permettant d'exécuter l'application de réalité virtuelle possédait un Processeur Intel® Core™ i7 de 8^{ème} génération et une carte graphique GeForce® GTX 1070 GDDR5 8 Go.



Figure 8 - Illustration du matériel utilisé dans les expérimentations. (A) Stimulateur électrique Micromed. (B) Casque de réalité virtuelle HTC Vive. (C) Capteur de suivi des mouvements Vive Tracker.

2.6. Incarnation visuomotrice

Une stimulation visuomotrice a été mise en place en début d'expérimentation pour leur permettre de s'incarner efficacement dans leur avatar dans une vue à la première personne. Cette phase de stimulation visuomotrice consistait à présenter une vidéo d'une minute environ dans l'environnement virtuel afin que les participants reproduisent les gestes tels que tendre les bras ou serrer les poings par exemple (**Figure 9**).

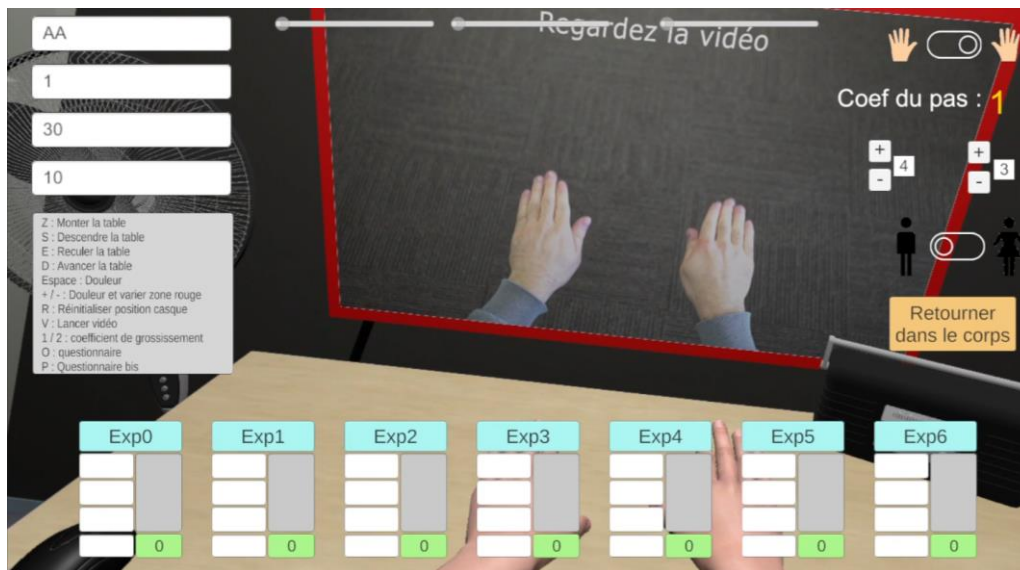


Figure 9 - Illustration de la stimulation visuomotrice. Les participants regardaient une vidéo d’une durée d’une minute environ et reproduisaient les gestes à l’identique en se focalisant sur leurs propres mains virtuelles. Ils étaient colocalisés avec leur avatar et les mouvements des bras virtuels étaient identiques aux mouvements des bras réels. L’interface n’était visible que par l’expérimentateur.

2.7. Évaluation des scores d’incarnation

Les scores d’incarnation ont été calculés à partir des niveaux des quatre composantes de l’incarnation que sont l’agentivité, la possession corporelle, la localisation de soi et l’apparence extérieure.

Les niveaux de ces composantes ont eux-mêmes été obtenus à partir des réponses des participants au questionnaire d’incarnation (cf. partie « **2.13. Questionnaires** » de ce chapitre pour plus d’informations sur l’intitulé des questions).

Les équations ci-dessous résument les calculs effectués pour déterminer les niveaux spécifiques des différentes composantes de l’incarnation. Dans le cas de l’agentivité, de la possession corporelle et de la localisation de soi, une valeur de 3 a été ajoutée au niveau obtenu afin d’obtenir un niveau final allant de 0 à 6.

- *Possession corporelle* = $\frac{Q1-Q2}{2} + 3$
- *Agentivité* = $\frac{Q3-Q4}{2} + 3$
- *Localisation de soi* = $\frac{Q5-Q6}{2} + 3$
- *Apparence extérieure* = $\frac{Q7+Q8}{2} + 3$

Les scores d'incarnation ont été calculés selon la méthode proposée par Gonzalès et Peck [117] en reprenant les mêmes questions relatives à l'incarnation. Ces scores correspondent aux niveaux des différentes composantes de l'incarnation multipliés par un coefficient de pondération (de 2 pour la possession corporelle, l'agentivité et la localisation de soi et de 1 pour l'apparence extérieure) et divisés par la somme des coefficients de pondération. Cette pondération s'explique par le fait que chaque composante a une influence plus ou moins importante dans l'incarnation. La valeur de 2,5714 a été ajoutée au score de chaque participant afin d'obtenir des valeurs allant de 0 à 6.

L'équation ci-dessous résume le calcul effectué afin d'obtenir le score final d'incarnation pour chaque participant :

$$Incarnation = \frac{\frac{Q1 - Q2}{2} * 2 + \frac{Q3 - Q4}{2} * 2 + \frac{Q5 - Q6}{2} * 2 + \frac{Q7 + Q8}{2} * 1}{2 + 2 + 2 + 1} + 2,5714$$

2.8. Représentation visuelle de la douleur

La représentation visuelle de la sensation électrique a été présentée sous la forme d'une sphère rouge. Elle apparaissait sur le bras de l'avatar (**Figure 10A**) ou sur le mur à deux mètres de distance de l'avatar (**Figure 10B**) en fonction des conditions expérimentales.

La représentation visuelle apparaissait seulement à partir du moment où le seuil de perception du participant était atteint (cf. « **2.10. Détermination du seuil douloureux** » de ce chapitre pour plus d'informations).

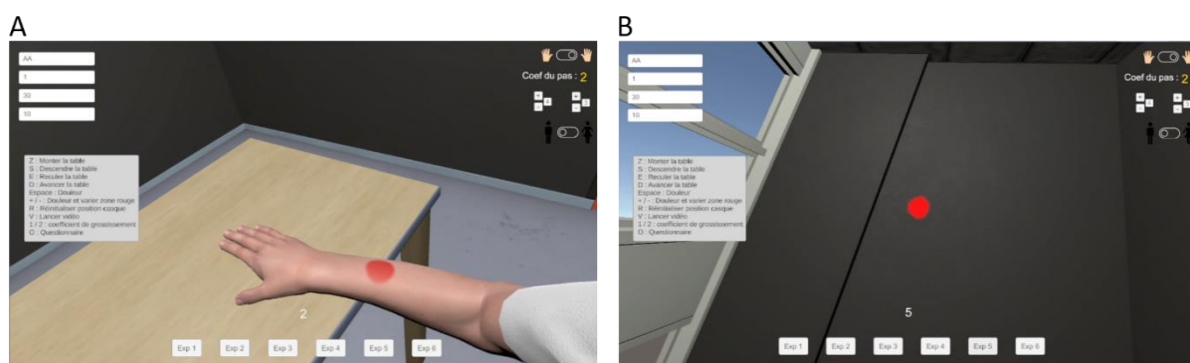


Figure 10 - Illustration de la représentation visuelle visible par les participants. Elle apparaissait sous la forme d'une sphère rouge sur le bras (**A**) ou le mur (**B**). Sa taille pouvait varier en fonction des conditions expérimentales.

2.9. Stimulations électriques

Les stimulations électriques étaient envoyées de façon randomisée toutes les 1 à 2 secondes pour une durée de 1 ms. L'envoi des impulsions électriques était contrôlé manuellement par l'expérimentateur à partir de l'environnement virtuel.

2.10. Détermination du seuil douloureux

Le seuil douloureux était déterminé à l'aide d'un protocole en escalier [192], [193].

Le principe repose sur le fait que l'intensité de la stimulation électrique débute de 0 mA et augmente progressivement par paliers de 0,1 mA jusqu'à atteindre le seuil de perception du participant. Ce seuil de perception correspond à l'intensité où le participant ressent une sensation dans le bras et le signale à l'expérimentateur (indiqué en vert et nommé SP dans la **Figure 11**).

À partir de ce seuil de perception, les intensités électriques augmentent progressivement par paliers de 0,2 mA jusqu'à atteindre le seuil douloureux du participant. Ce seuil douloureux correspond à l'instant où le participant estime que l'intensité électrique reçue est douloureuse (indiqué en rouge et nommé SD1 dans la **Figure 11**).

À partir de ce seuil douloureux, l'expérimentateur diminue l'intensité électrique par paliers de 0,2 mA au maximum trois fois de suite avant de ré-augmenter l'intensité électrique par palier de 0,1 mA pour affiner la précision du second seuil douloureux (indiqué en rouge et nommé SD2 dans la **Figure 11**).

Une fois le second seuil douloureux obtenu, l'expérimentateur diminue, de nouveau, l'intensité par paliers de 0,2 mA au maximum trois fois avant de ré-augmenter l'intensité sauf si le participant a estimé que le troisième seuil douloureux était atteint avant (comme indiqué en rouge et nommé SD3 dans la **Figure 11**).

Le seuil douloureux final du participant pour une condition donnée était alors calculé comme étant la moyenne des trois seuils douloureux obtenus.

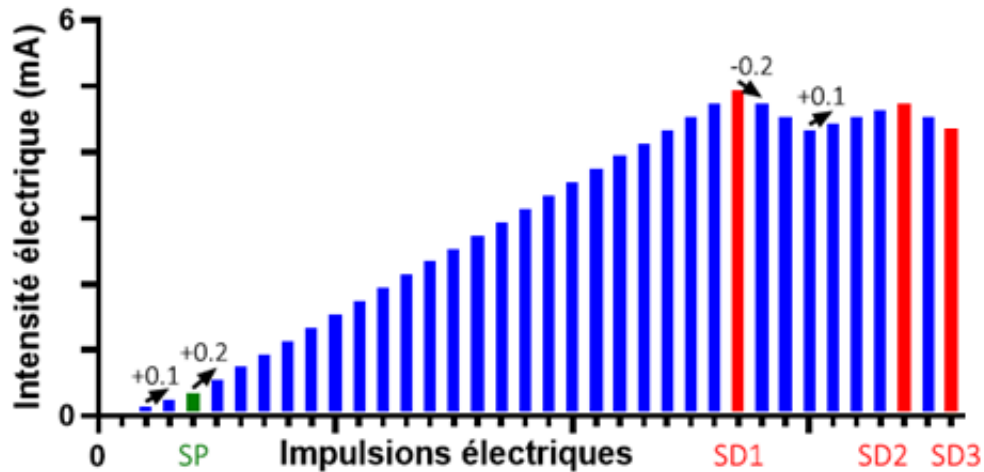


Figure 11 - Schéma explicatif du protocole de l'escalier réalisé afin de déterminer le seuil douloureux d'un participant lors d'une condition expérimentale. SP : seuil de perception ; SD1 : premier seuil douloureux ; SD2 : second seuil douloureux et SD3 : troisième seuil douloureux.

2.11. Détermination du facteur de grossissement

La détermination du facteur de grossissement de la représentation visuelle a été indispensable pour les études 2 et 3 afin d'augmenter la taille de la sphère de manière cohérente entre les différents participants.

Les seuils douloureux fluctuaient fortement d'un sujet à l'autre. Pour permettre d'avoir un « pas » de grossissement de la représentation visuelle de la douleur identique en fonction du ressenti de la stimulation électrique, il était nécessaire de calibrer au préalable chaque sujet en fonction de son propre seuil douloureux.

Afin de permettre cette calibration, nous avons retenu le seuil obtenu lors de l'évaluation du seuil douloureux basal (cf. partie « **2.10. Détermination du seuil douloureux** » de ce chapitre). Nous l'avons divisé par le nombre de « pas » nécessaires pour aller de la taille minimale jusqu'à la taille maximale de la représentation visuelle possible (soit 100). Ces tailles minimales et maximales étaient identiques à tous les participants et étaient déterminées visuellement par l'expérimentateur en amont de toutes les expérimentations afin d'obtenir un rendu visuel cohérent et esthétique dans l'environnement virtuel.

Ainsi, pour deux sujets différents, le « pas » d'augmentation de la stimulation électrique était identique (+0,2 mA à chaque impulsion) mais le « pas » de grossissement de la représentation visuelle était différent. Pour illustrer cette étape de calibration, et à titre d'exemple, un

participant ayant un seuil douloureux basal de 10 mA obtient un facteur de grossissement « x » de 10/100 soit $x = 0,1$. Ce facteur de grossissement engendre donc une augmentation de la représentation visuelle d'un facteur additionnel (ou soustractif) de 0,1 à chaque fois que la stimulation électrique augmente (ou diminue) de 0,2 mA.

Lorsque l'intensité électrique augmentait (ou diminuait) seulement de 0,1 mA, ce facteur x était divisé par 2.

2.12. Ordre de passage des conditions

Pour une étude donnée, chaque participant passait l'ensemble des conditions expérimentales. Toutefois, pour une raison de contrebalancement des effets, un ordre a été prédéfini en amont de l'étude.

Pour les études 1 et 2, et dans un premier temps, les conditions intracorporelles ont été choisies de façon aléatoire, tout comme les conditions extracorporelles. Dans un second temps, l'ordre de passage des conditions intracorporelles ou extracorporelles a, lui aussi, été déterminé de façon aléatoire (cf. partie « **Stratégie expérimentale** » des chapitres 1 et 2 pour plus d'informations).

Pour l'étude 3, les conditions de passation en vue à la première personne (1PP) ont été choisies de façon aléatoire, tout comme celles en vue à la troisième personne (3PP). Toutefois, les conditions en vue à la première personne ont nécessairement été passées avant les conditions à la troisième personne. Cet ordre a été imposé étant donné que les participants devaient être parfaitement incarnés dans leur avatar avant d'effectuer une sortie de corps simulée (cf. partie « **Stratégie expérimentale** » du chapitre 3 pour plus d'informations).

2.13. Questionnaires

Un questionnaire a été proposé aux participants directement dans l'environnement virtuel. Chaque question a été évaluée sur une échelle continue de Likert à 7 points allant de 0 (fortement en désaccord) à 6 (tout à fait d'accord). Les participants ont répondu à l'aide d'un joystick et un curseur indiquait avec précision l'emplacement de la réponse choisie sur l'échelle.

Le questionnaire était présenté à chaque condition expérimentale et les questions ont été présentées dans un ordre randomisé pour chaque condition.

Le questionnaire regroupait des questions d’incarnation et des questions créées spécialement pour évaluer l’impact de la représentation visuelle sur le participant lorsque la condition le permettait. Les questions relatives à l’incarnation sont regroupées dans le **Tableau III** et celles relatives à la représentation visuelle sont regroupées dans le **Tableau IV**.

Tableau III - Questions relatives à l'incarnation. Le numéro des questions est indiqué dans la première colonne et les intitulés des questions dans la seconde colonne.

N°	Intitulé de la question
Possession corporelle	
Q1	J'avais l'impression que le bras virtuel était mon bras.
Q2	J'avais l'impression que le bras virtuel était le bras de quelqu'un d'autre.
Agentivité (contrôle moteur)	
Q3	J'avais l'impression de pouvoir contrôler le bras virtuel comme si c'était le mien.
Q4	J'avais l'impression que le bras virtuel bougeait par lui-même.
Emplacement du corps	
Q5	J'avais l'impression que mon corps était situé là où j'ai vu le corps virtuel.
Q6	J'avais l'impression de me sentir hors de mon corps.
Apparence extérieure	
Q7	Il a semblé que le bras virtuel ressemblait à mon propre bras (réel), en termes de forme, de ton de peau ou d'autres caractéristiques visuelles.
Q8	J'avais l'impression de porter des vêtements différents de ceux que j'ai reçus au laboratoire.

Tableau IV – Questions relatives à la représentation visuelle. Le numéro des questions est indiqué dans la première colonne et les intitulés des questions dans la seconde colonne.

N°	Intitulé de la question
Q1	J'ai eu l'impression de sentir la stimulation à l'endroit où j'ai vu la sphère rouge.
Q2	J'ai eu l'impression de sentir la stimulation à un endroit différent de l'emplacement où j'ai vu la sphère rouge.
Q3	J'ai eu l'impression que la sphère rouge était dans mon bras.
Q4	J'ai eu l'impression que la sphère rouge était hors de mon bras.
Q5	J'ai eu l'impression que la douleur était dans mon bras.
Q6	J'ai eu l'impression que la douleur était hors de mon bras.
Q7	J'ai eu l'impression que la sphère rouge était ma douleur.
Q8	J'ai eu l'impression que la sphère rouge n'avait aucun rapport avec ma douleur.

2.14. Analyses statistiques

Différentes analyses statistiques ont été effectuées en fonction de la nature des données.

Ainsi, lorsque les données suivaient une loi normale, des tests paramétriques ont été utilisés. Dans le cadre de nos expérimentations, l'analyse de la variance (ANOVA) à mesures répétées à deux facteurs était le test statistique le plus adapté afin de comparer les conditions entre elles selon deux facteurs définis. Un test post-hoc de comparaisons multiples de Tukey a complété les analyses afin de comparer les conditions deux à deux.

En revanche, lorsque les données ne suivaient pas une loi normale, des tests non paramétriques ont été utilisés tel que le test de Friedman qui est l'équivalent de l'ANOVA. Un test post-hoc de comparaisons multiples de Dunn a également complété les analyses afin de comparer les conditions deux à deux.

Dans le cadre des tests non paramétriques, un test de Wilcoxon a été utilisé dans certaines situations pour comparer les conditions deux à deux de deux groupes différents lorsque les

données étaient appariées. Lorsque les données étaient non appariées, un test de Mann-Whitney a été utilisé.

En outre, étant donné qu'il n'existe pas de test non paramétrique équivalent à une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs, cette dernière a été néanmoins utilisée en complément du test de Friedman. L'objectif de cette analyse supplémentaire était d'apporter des informations complémentaires quant à l'analyse et à l'interprétation des résultats.

CHAPITRE 1

Étude de l'impact d'une représentation
visuelle de taille unique sur les seuils
douloureux et l'incarnation

3. Chapitre 1

3.1. Introduction

Les données de la littérature étudiant la modulation de la douleur en réalité virtuelle se basent principalement sur le phénomène de distraction [194]. L'objectif est ainsi de détourner l'attention des participants sur autre chose que leur propre douleur afin de la moduler.

Cependant, peu d'études se réfèrent à la conscience corporelle pour moduler les perceptions douloureuses. Le principe repose principalement sur le fait que les participants s'incarnent dans un avatar en réalité virtuelle et que les niveaux douloureux sont évalués. Le corps virtuel peut ainsi, par exemple, être agressé ou déformé [181]. Plus rarement, une représentation visuelle a pu être utilisée pour représenter la douleur sur un corps virtuel [189]. Il est toutefois difficile, à ce jour, de trouver des travaux ayant réellement fait varier les paramètres de cette représentation visuelle pour en étudier les conséquences sur la perception douloureuse.

L'utilisation d'une association entre une représentation visuelle et une stimulation sensorielle est toutefois plus courante dans les études visant à étudier la modulation de l'incarnation en réalité virtuelle [195]. Décrite dans la littérature sous le terme de « stimulation visuotactile », elle permet un meilleur niveau d'incarnation des participants. Elle repose sur l'utilisation d'une stimulation tactile (vibration ou caresse par exemple) et d'un retour visuel cohérent sur le corps virtuel du participant. Cette technique est adaptée du paradigme de la main en caoutchouc développé par Botvinich et Cohen [112].

Dans le cas de l'étude de l'incarnation, et de manière identique à la douleur, les travaux s'intéressant à la modulation de la représentation visuelle et de la stimulation tactile sont peu nombreux.

L'objectif de cette première étude est donc de moduler ces deux paramètres (représentation visuelle et stimulation tactile) pour en évaluer les conséquences sur l'incarnation et la perception douloureuse. Pour cela, nous avons comparé la représentation visuelle lorsqu'elle était présente ou absente, lorsqu'elle était synchrone ou asynchrone à la stimulation électrique et enfin, lorsqu'elle était à l'intérieur ou hors du corps virtuel.

La première partie de ce chapitre présentera la stratégie expérimentale mise en place sélectivement dans cette première étude. La seconde partie s'intéressera aux résultats obtenus et sera divisée elle-même en deux sous-parties. Les résultats liés à l'incarnation seront présentés dans un premier temps et les résultats liés à la douleur seront présentés dans un second. La dernière partie, quant à elle, sera consacrée à la discussion et à la conclusion de cette étude.

3.2. Stratégie expérimentale de l'étude 1

Les informations présentées dans ce paragraphe concernent exclusivement l'étude 1 et n'ont pas été mentionnées dans la partie « matériels et méthodes » du manuscrit.

Cette étude a reçu un avis favorable du comité de protection des personnes (CPP) Est I (ID RCB 2019-A01989-48).

3.2.1. Participants

20 volontaires (10 hommes et 10 femmes) ont participé à cette étude. La moyenne d'âge était de 23,15 (SD = 3,13 ; min = 19 ; max = 32). Tous les participants se sont portés volontaires et ont donné leur consentement au préalable.

3.2.2. Protocole expérimental

Les participants ont passé six conditions expérimentales en réalité virtuelle dans un ordre randomisé (cf. partie « matériels et méthodes » pour plus d'informations).

Le protocole expérimental a été divisé en deux parties : trois conditions où les participants regardaient le bras de leur corps virtuel (conditions intracorporelles : **Figures 12A à 12C**) et trois conditions où ils regardaient un mur (conditions extracorporelles : **Figures 12D à 12F**).

Pour chacun de ces contextes, trois conditions ont été proposées. Dans la première, une stimulation électrique était délivrée sur le bras dominant du participant mais aucune représentation visuelle (sphère rouge) n'apparaissait (ni sur le bras en condition intracorporelle, ni sur le mur en condition extracorporelle : **Figures 12A et 12D**).

Dans la seconde, la stimulation électrique était délivrée de manière synchrone à l'apparition de la représentation visuelle (**Figures 12B et 12E**).

Dans la dernière partie, la stimulation électrique était délivrée 200 ms avant l'apparition de la représentation visuelle (Figures 12C et 12F).

Les participants avaient pour consigne de ne pas bouger et de fixer la sphère du regard durant toute la durée de l'expérimentation. La représentation visuelle était identique en apparence et de taille unique quelles que soient les intensités électriques délivrées et les conditions expérimentales choisies.

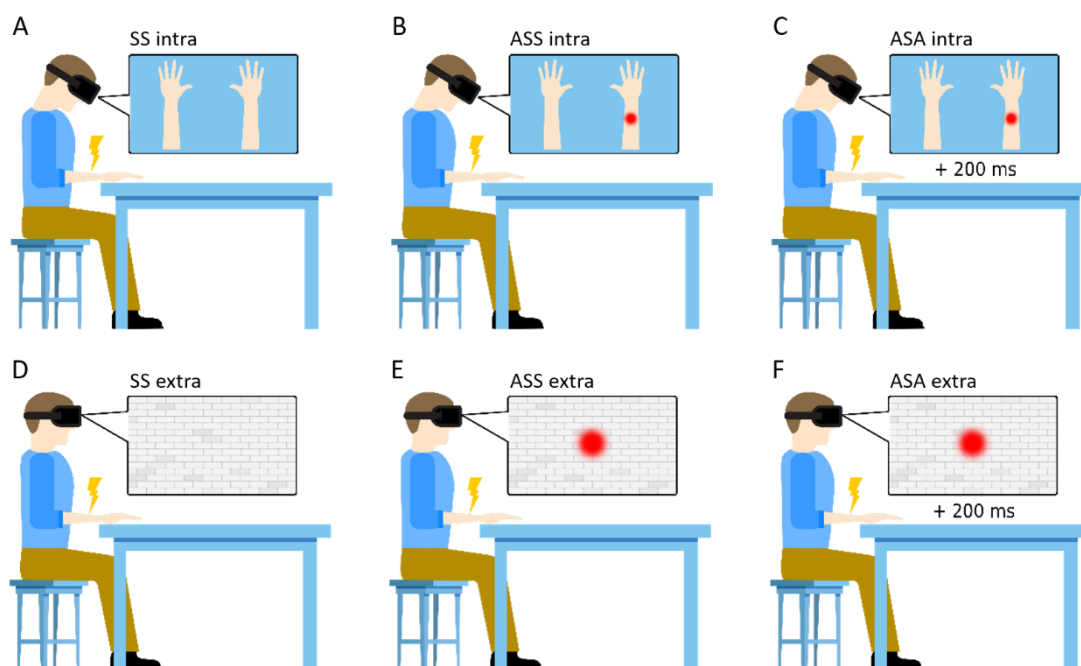


Figure 12 – Schéma du protocole expérimental. (A) **Condition sans sphère intracorporelle (SS intra).** Les participants regardent leur bras dominant et aucune représentation visuelle (sphère) n'apparaît sur leur bras lorsqu'ils reçoivent une stimulation électrique sur le bras. (B) **Condition avec sphère synchrone intracorporelle (ASS intra).** Les participants regardent leur bras dominant et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur leur bras de manière synchrone à la stimulation électrique sur le bras (condition ASS intracorporelle). (C) **Condition avec sphère asynchrone intracorporelle (ASA intra).** Les participants regardent leur bras dominant et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur leur bras 200 ms après (asynchronie) la stimulation électrique sur le bras. (D) **Condition sans sphère extracorporelle (SS extra).** Les participants regardent le mur et aucune représentation visuelle (sphère) n'apparaît sur le mur lorsqu'ils reçoivent une stimulation électrique sur le bras. (E) **Condition avec sphère synchrone extracorporelle (ASS extra).** Les participants regardent le mur et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur le mur de manière synchrone à la stimulation électrique sur le bras. (F) **Condition avec sphère asynchrone extracorporelle (ASA extra).** Les participants regardent le mur et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur le mur 200 ms après (asynchronie) la stimulation électrique sur le bras.

3.3. Résultats

3.3.1. Impact de la représentation visuelle sur l'incarnation

3.3.1.1. Vérification des prérequis

Un prérequis à l'exploitation des résultats était que tous les sujets soient bien incarnés dans leur avatar. Ce niveau d'incarnation variait entre 0 (pas d'incarnation) et 6 (niveau d'incarnation élevé). Il prenait en compte quatre composantes de l'incarnation : l'agentivité (capacité à contrôler son corps virtuel) ; la possession (appropriation de son corps virtuel) ; la localisation de soi (juxtaposition du corps virtuel au corps réel) et l'apparence extérieure (réalisme du corps virtuel par rapport au corps réel). Pour plus de pertinences dans l'analyse des résultats, si le niveau de l'incarnation globale obtenu dans les conditions intracorporelles était inférieur à la moyenne de 3 sur 6, alors le participant était exclu de l'analyse des données.

Nous avons ainsi analysé la répartition (**Figure 13A**) et la distribution (**Figure 13B**) des niveaux d'incarnation de chaque participant pour chaque condition expérimentale.

Les résultats ont montré que la dispersion des scores d'incarnation au sein des conditions était faible pour tous les participants et que les niveaux d'incarnation étaient tous supérieurs à la moyenne dans les conditions intracorporelles.

Par conséquent, tous les participants de l'étude ont été inclus dans l'analyse des résultats.

De manière plus précise, les résultats ont montré que 90% des participants avaient des niveaux d'incarnation supérieurs à 4 sur 6 quelles que soient les conditions expérimentales (**Figure 13B**). Nous pouvons cependant noter que deux participants ont eu des niveaux inférieurs à la moyenne dans les conditions sans sphère (SS extra) et avec sphère synchrone extracorporelles (ASS extra). Ces deux participants n'ont toutefois pas été exclus de l'analyse puisqu'il s'agissait de conditions extracorporelles (**Figure 13A**).

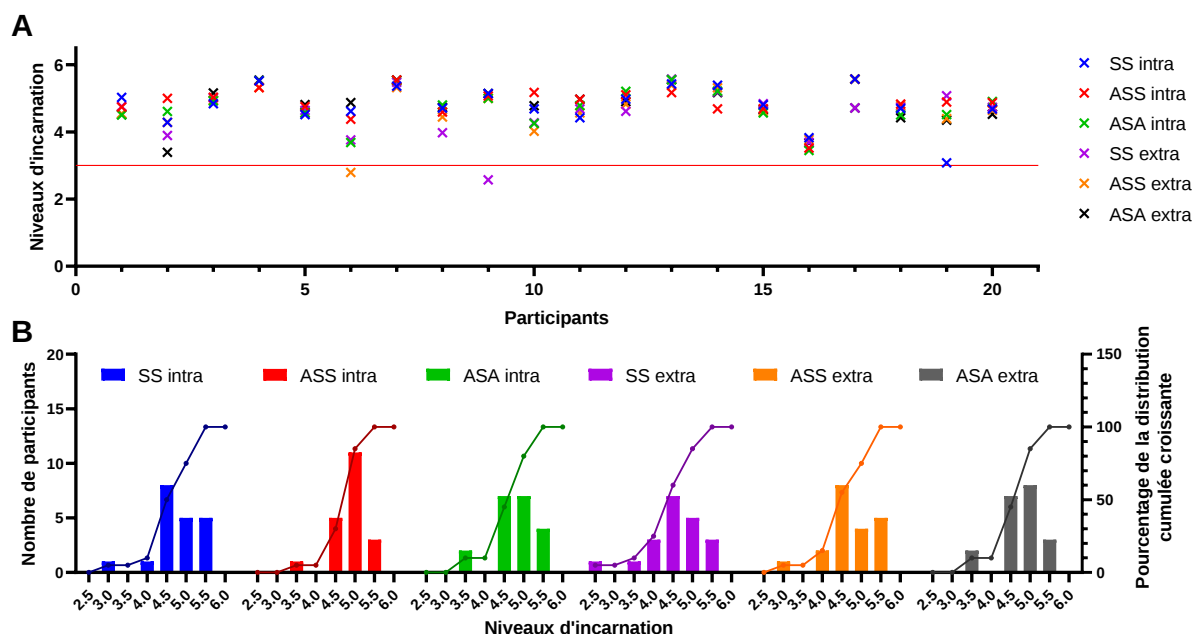


Figure 13 - Répartition et distribution des niveaux d'incarnation des participants pour chaque condition expérimentale. (A) Niveau d'incarnation de chaque participant pour chaque condition. La ligne rouge indique la moyenne seuil de l'incarnation (3 sur 6) au-dessus de laquelle les sujets sont considérés comme bien incarnés. **(B) Distribution du nombre de participants en fonction de leurs scores d'incarnation pour chaque condition (histogramme).** Le pourcentage de la distribution cumulée croissante est présenté sur le même graphique et indiqué par les points reliés. SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; ASA : avec sphère asynchrone ; intra : intracorporelle (sphère sur le bras) ; extra : extracorporelle (sphère sur le mur).

Ces résultats montrent que les niveaux d'incarnation étaient élevés pour l'ensemble des participants.

3.3.1.2. Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle

Nous voulions étudier l'impact de la présence de la représentation visuelle d'une stimulation électrique de taille unique sur les différentes composantes de l'incarnation (les niveaux d'agentivité, de possession, de localisation de soi, d'apparence extérieure) et sur l'incarnation elle-même. Pour cela, nous avons comparé les conditions où aucune sphère n'apparaissait (SS) à celles où une sphère apparaissait de manière synchrone (ASS) aussi bien sur le bras (intracorporelle) que sur le mur (extracorporelle).

D'une manière générale, et comme indiqué dans le **Tableau V**, les niveaux d'agentivité (**Figure 14A**), de possession (**Figure 14B**) et de localisation de soi (**Figure 14C**) étaient élevés alors que

les niveaux d'apparence extérieure (**Figure 14D**) étaient beaucoup plus faibles. La prise en compte de l'ensemble de ces composantes a permis d'obtenir des niveaux d'incarnation globaux (**Figure 14E**) élevés.

Tableau V – Résumé des moyennes et des écarts-types de l'incarnation et de ses composantes en fonction de l'absence ou de la présence d'une représentation visuelle en conditions intracorporelles ou extracorporelles.

SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

	SS intra	ASS intra	SS extra	ASS extra
Agentivité	5,22	5,30	5,03	5,24
	± 0,67	± 0,54	± 0,89	± 0,60
Possession corporelle	4,98	5,19	4,80	4,97
	± 1,17	± 0,60	± 1,02	± 0,99
Localisation de soi	5,23	5,26	4,98	4,80
	± 0,60	± 0,49	± 0,85	± 0,89
Apparence extérieure	2,73	2,88	2,60	2,65
	± 0,58	± 0,73	± 0,89	± 0,51
Incarnation	4,80	4,90	4,59	4,65
	± 0,60	± 0,44	± 0,73	± 0,64

Afin de comparer les composantes de l'incarnation des différentes conditions, et comme les données ne suivaient pas une loi normale, un test de Friedman a été effectué. Ces analyses ont montré une différence significative pour les paramètres localisation de soi ($p = 0,032$) et incarnation ($p = 0,049$). Toutefois, les analyses multiples post-hoc de Dunn n'ont montré aucune différence de ces paramètres d'incarnation entre les conditions avec ou sans sphère à la fois sur le bras et sur le mur.

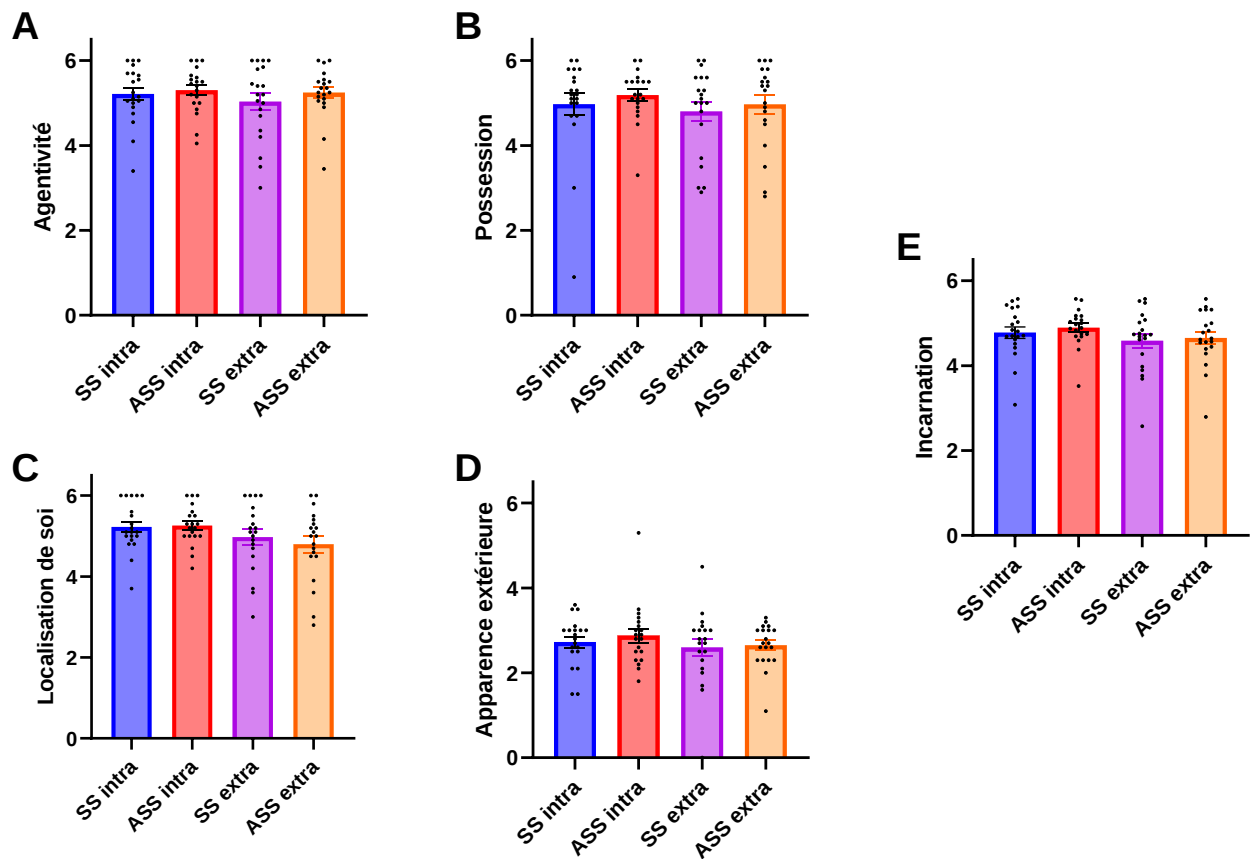


Figure 14 – Impact de l’absence ou de la présence d’une représentation visuelle sur les différentes composantes de l’incarnation, en conditions intracorporelles et extracorporelles. La présence d’une représentation visuelle ne module pas les niveaux d’agentivité (A), de possession corporelle (B), de localisation de soi (C), d’apparence extérieure (D) et d’incarnation (E). SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; intra : intracorporel ; extra : extracorporelle.

La présence d’une représentation visuelle de taille unique ne semble pas moduler les niveaux d’incarnation aussi bien lorsqu’elle apparaît sur le bras que sur le mur.

3.3.1.3. Influence de la synchronie et de l'asynchronie d'une représentation visuelle

Nous voulions également déterminer si la synchronie ou l'asynchronie d'une représentation visuelle pouvait moduler les mêmes paramètres d'incarnation que précédemment. Ainsi, nous avons comparé les conditions où la sphère apparaissait de manière synchrone (ASS) et asynchrone (ASA) à la fois sur le bras (intracorporelle) et sur le mur (extracorporelle).

Comme précisé dans la **Tableau VI**, les niveaux d'agentivité (**Figure 15A**), de possession (**Figure 15B**) et de localisation de soi (**Figure 15C**) étaient de nouveau élevés alors que les niveaux d'apparence extérieure (**Figure 15D**) restaient plus faibles. Les niveaux d'incarnation (**Figure 15E**) se maintenaient, eux aussi, à des niveaux élevés.

Tableau VI - Résumé des moyennes et des écarts-types de l'incarnation et de ses composantes en fonction de la présence d'une représentation visuelle synchrone ou asynchrone en conditions intracorporelles ou extracorporelles. ASS : avec sphère synchrone ; ASA : avec sphère asynchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

	ASS intra	ASA intra	ASS extra	ASA extra
Agentivité	5,30	5,27	5,24	5,30
	± 0,54	± 0,58	± 0,60	± 0,60
Possession corporelle	5,19	4,90	4,97	5,04
	± 0,60	± 1,15	± 0,99	± 1,04
Localisation de soi	5,26	5,18	4,80	4,99
	± 0,49	± 0,60	± 0,89	± 0,87
Apparence extérieure	2,88	2,88	2,65	2,86
	± 0,73	± 0,56	± 0,51	± 0,47
Incarnation	4,90	4,78	4,65	4,77
	± 0,44	± 0,58	± 0,64	± 0,56

En prenant en compte l'ensemble des conditions, le test de Friedman a indiqué une différence significative du paramètre localisation de soi ($p = 0,043$). En revanche, les tests post-hoc de Dunn n'ont pas permis de révéler de différence entre les conditions où la sphère était synchrone versus asynchrone aussi bien sur le bras que sur le mur.

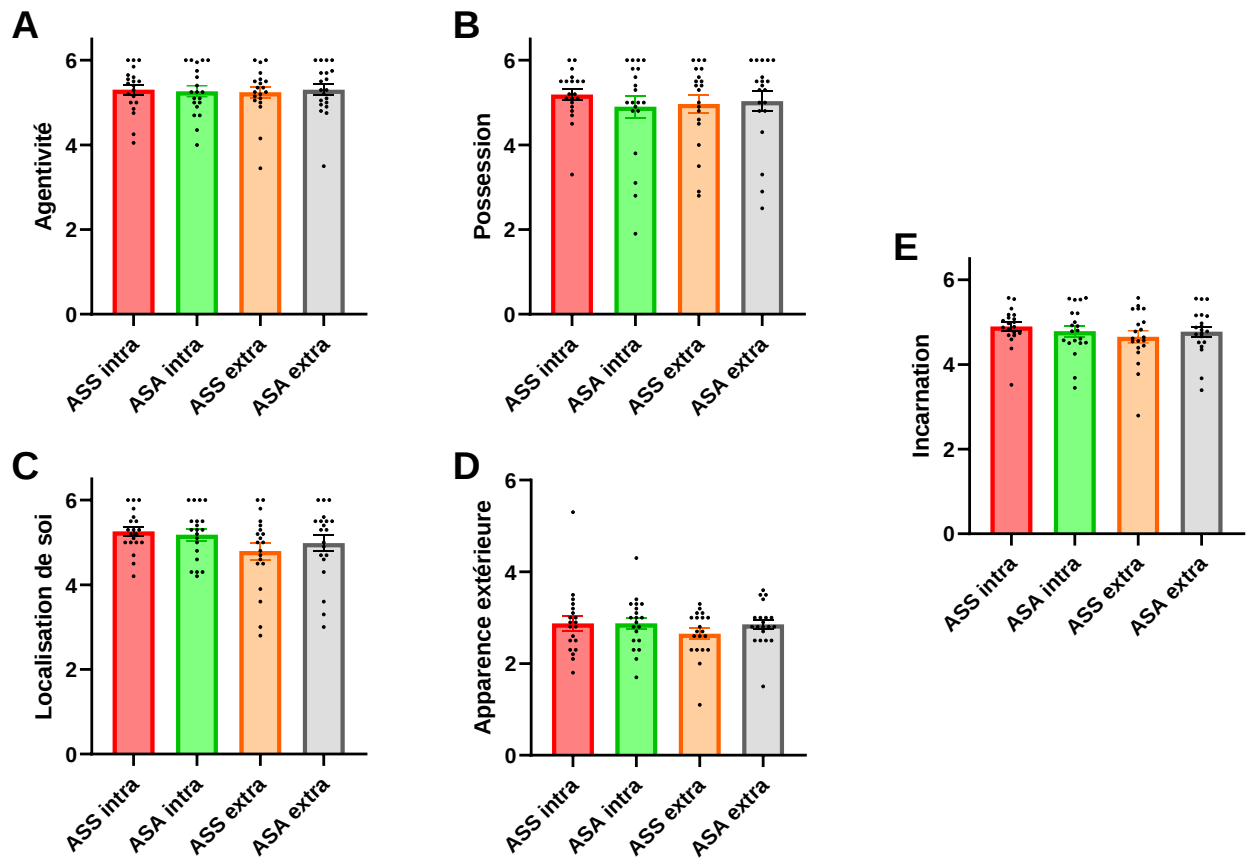


Figure 15 - Impact de la présence d'une représentation visuelle synchrone et asynchrone sur les différentes composantes de l'incarnation en conditions intracorporelles et extracorporelle. L'asynchronie d'une représentation visuelle ne module pas les niveaux d'agentivité (A), de possession corporelle (B), de localisation de soi (C), d'apparence extérieure (D) et d'incarnation (E). ASS : avec sphère synchrone ; ASA : avec sphère asynchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Par conséquent, la présence d'une représentation visuelle de taille unique synchrone ou asynchrone avec un délai de 200 ms ne semble pas modifier les différents paramètres de l'incarnation.

3.3.1.4. Influence de la localisation d'une représentation visuelle

Le dernier facteur que nous souhaitions étudier était l'influence du regard du participant. En d'autres termes, savoir si le fait de regarder son bras ou le mur pouvait moduler les niveaux d'incarnation des participants. Pour cela, nous avons de nouveau analysé les niveaux d'agentivité, de possession, de localisation de soi, d'apparence extérieure et d'incarnation en comparant les conditions intracorporelles et extracorporelles. Ces comparaisons ont été analysées lorsque la sphère était absente (SS) ou présente (ASS) et lorsqu'elle était synchrone (ASS) ou asynchrone (ASS) à la stimulation électrique délivrée. Dans cette partie, nous avons réalisé une analyse de la variance à mesures répétées à deux facteurs (ANOVA rm) afin de compléter les analyses non paramétriques de Friedman (présentées dans les deux parties précédentes). Les deux facteurs analysés étaient d'une part, « localisation du regard : bras versus mur » et d'autre part « représentation visuelle : présence versus absence » ou « représentation visuelle : synchronie versus asynchronie ».

L'ANOVA rm a montré que le facteur « localisation du regard : bras versus mur » avait un effet significatif de la localisation de soi pour les conditions avec ou sans représentation visuelle ($F(1,19) = 6,597$; $p = 0,019$; **Figure 16A**) et pour les conditions avec représentation visuelle synchrone ou asynchrone ($F(1,19) = 6,345$; $p = 0,021$; **Figure 16B**). En effet, les niveaux globaux de localisation de soi étaient plus élevés lorsque les participants regardaient leur bras plutôt que le mur. Les analyses post-hoc de Tukey ont toutefois montré qu'il n'existait pas de différence entre les conditions comparées deux à deux (SS intra versus SS extra et ASS intra versus ASS extra).

Le facteur « localisation du regard : bras versus mur » a également montré une tendance concernant l'incarnation pour les conditions avec ou sans représentation visuelle ($F(1,19) = 4,057$; $p = 0,058$; **Figure 16C**) et pour les conditions avec représentation visuelle synchrone ou asynchrone ($F(1,19) = 4,300$; $p = 0,052$; **Figure 16D**). Les niveaux globaux de localisation de soi étaient également plus élevés lorsque les participants regardaient leur bras plutôt que le mur.

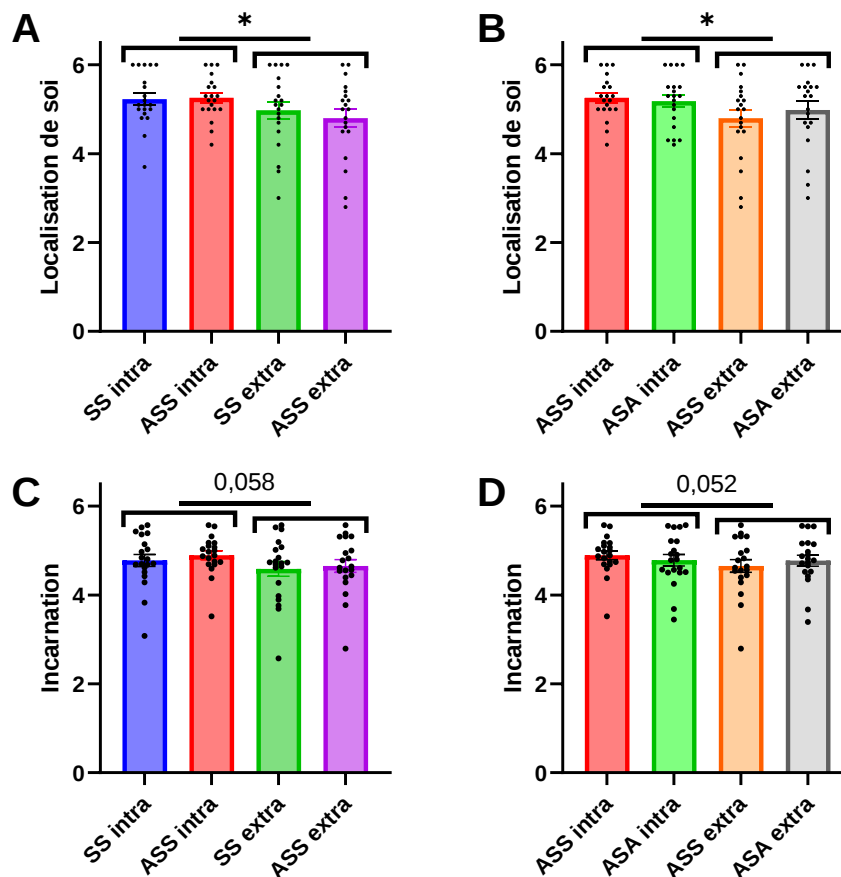


Figure 16 – Comparaisons des conditions intracorporelles et extracorporelles sur les niveaux de localisation de soi et d'incarnation (ANOVA rm). La présence d'une représentation visuelle sur le mur entraîne une diminution des niveaux de localisation de soi **(A)** aussi bien lorsqu'elle est synchrone qu'asynchrone **(B)**. Ces résultats tendent également à se confirmer concernant les niveaux d'incarnation **(C et D)**. ASS : avec sphère synchrone ; ASA : avec sphère asynchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Ces résultats montrent que regarder son bras augmente la localisation de soi (par rapport au fait de regarder le mur) et tendraient également à augmenter le niveau d'incarnation des participants.

3.3.2. Impact de la représentation visuelle sur la douleur

Le second objectif de notre étude était d'étudier l'impact d'une représentation visuelle sur la perception douloureuse. Nous avons donc de nouveau comparé les conditions où elle était présente (et de taille unique) versus absente et synchrone versus asynchrone.

3.3.2.1. Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle

Dans un premier temps, nous avons évalué l'impact de cette représentation visuelle de manière objective en déterminant les seuils douloureux et dans un second temps, nous l'avons évalué de manière subjective en analysant les réponses des participants.

Sur l'évaluation des seuils douloureux objectifs

Pour rappel, le seuil douloureux était obtenu (à trois reprises pour chaque condition) lorsque le participant indiquait oralement à l'expérimentateur que l'intensité électrique délivrée était douloureuse. La moyenne de ces trois seuils était ensuite calculée et utilisée pour les analyses (cf. partie « matériels et méthodes » pour plus d'informations).

Nous avons ainsi comparé les seuils douloureux moyens des conditions avec sphère (ASS) et sans sphère (SS) lorsqu'elle apparaissait sur le bras (intracorporelle) et sur le mur (extracorporelle). Un test de Friedman a été effectué et complété par une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs. Le premier était « représentation visuelle : présence versus absence » et le second était « localisation du regard : bras versus mur ».

Comme indiqué dans la **Figure 17**, les seuils douloureux n'étaient pas différents dans les conditions d'absence ou de présence de la sphère, qu'elle soit sur le bras ou sur le mur.

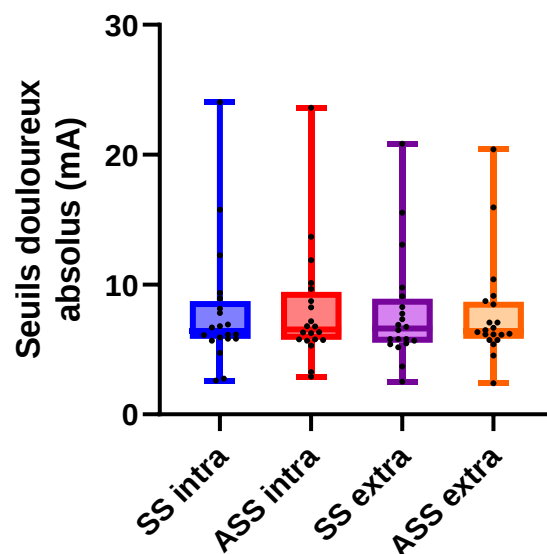


Figure 17 – Comparaison des seuils douloureux entre les conditions avec ou sans sphères. La présence d’une représentation visuelle ne module pas la sensation douloureuse. SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Par conséquent, la présence d’une représentation visuelle de taille unique d’une stimulation douloureuse ne permet pas moduler la perception de la douleur.

Sur les sensations douloureuses subjectives

Dans un second temps, nous voulions déterminer si la présence d’une représentation visuelle pouvait moduler subjectivement la sensation douloureuse corporelle. Autrement dit, est-ce que la présence d’une représentation visuelle sur le bras du participant augmentait la sensation douloureuse ou inversement, est-ce que la présence d’une représentation visuelle sur le mur la diminuait. Pour vérifier ces hypothèses, nous avons comparé les moyennes des réponses aux questions relatives à la localisation de la douleur dans le bras (**Figure 18A**) ou hors du bras (**Figure 18B**) en présence ou en absence d’une représentation visuelle sur le bras ou sur le mur. L’intitulé de ces questions étaient « J’ai eu l’impression que la douleur était dans mon bras » et « J’ai eu l’impression que la douleur était hors de mon bras ». Ces questions étaient antagonistes et permettaient ainsi de renforcer la validité de la réponse du participant.

D’une manière générale, et comme attendu par l’antagonisme des questions, la localisation de la douleur a fortement été estimée dans le bras ($5,2 \pm 1,3$) (**Figure 18A**) et faiblement estimée hors du bras ($0,7 \pm 1,1$) (**Figure 18B**). De manière plus précise, les analyses statistiques

n'ont montré aucune différence significative pour les questions relatives à la localisation de la douleur dans le bras (**Figure 18A**) ou hors du bras (**Figure 18B**) aussi bien lorsque la sphère était présente qu'absente et lorsque les participants regardaient leur bras ou le mur.

Il est toutefois intéressant de noter que les évaluations de la localisation de la douleur dans le bras étaient plus élevées en présence de la sphère (ASS intra ; **Figure 18A**) plutôt qu'en absence de sphère (SS intra ; **Figure 18A**). Cette tendance s'est également observée pour la question antagoniste puisque les participants ont sous-estimé le fait que la douleur était hors de leur bras lorsque la sphère apparaissait sur leur bras (ASS intra ; **Figure 18B**).

De même, il est également intéressant de remarquer qu'une tendance apparaît aussi dans les conditions extracorporelles. En effet, lorsque les participants fixaient le mur et qu'une sphère apparaissait (ASS extra), ils surestimaient le fait que la douleur était hors de leur corps (**Figure 18B**). Cette tendance n'a, toutefois, pas été observée avec la question inverse (**Figure 18A**).

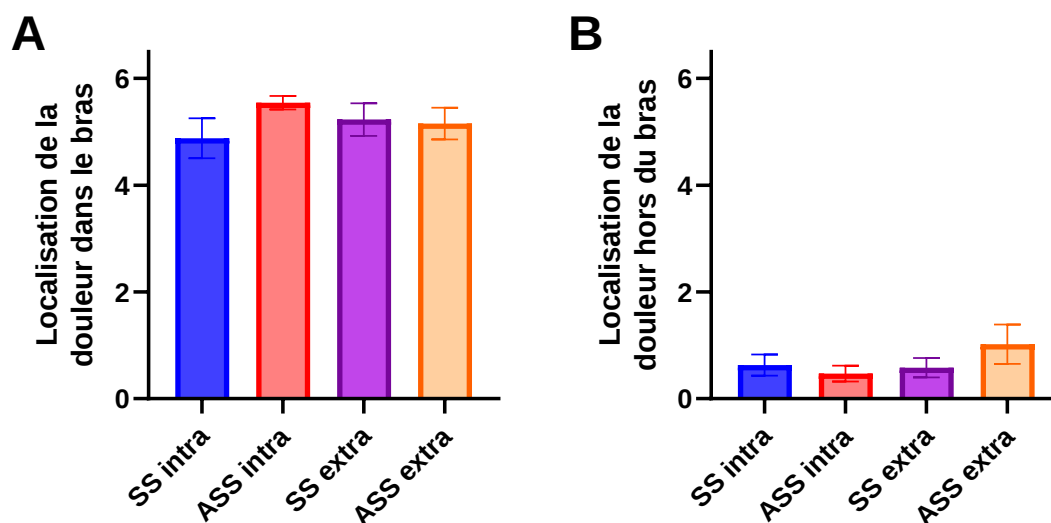


Figure 18 – Comparaison de l'évaluation de la localisation subjective de la douleur en fonction de la présence ou de l'absence d'une représentation visuelle sur le bras ou sur le mur. La présence ou l'absence d'une représentation visuelle sur le bras ou sur le mur ne module pas les réponses des participants concernant la localisation de la douleur dans le bras (**A**) ou hors du bras (**B**). SS: sans sphère synchrone ; ASS: avec sphère synchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Par conséquent, la présence d'une représentation visuelle de taille unique apparaissant sur le bras ou sur le mur ne modifie pas la sensation douloureuse dans le bras bien qu'elle semble, cependant, perturber légèrement les réponses des participants.

3.3.2.2. Influence de la synchronie et de l'asynchronie d'une représentation visuelle

Sur l'évaluation des seuils douloureux objectifs

De même qu'avec l'incarnation, il était intéressant d'observer l'influence de la synchronie et de l'asynchronie d'une représentation visuelle sur la perception douloureuse. Les seuils douloureux ont été comparés en présence ou non de la représentation visuelle et en conditions intracorporelles et extracorporelles.

Comme l'illustre la **Figure 19**, les seuils douloureux moyens étaient similaires dans toutes les conditions expérimentales et aucune différence significative n'a été observée à l'aide du test de Friedman et d'une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs. Le premier facteur était « représentation visuelle : synchronie versus asynchronie » et le second était « localisation du regard : bras versus mur ».

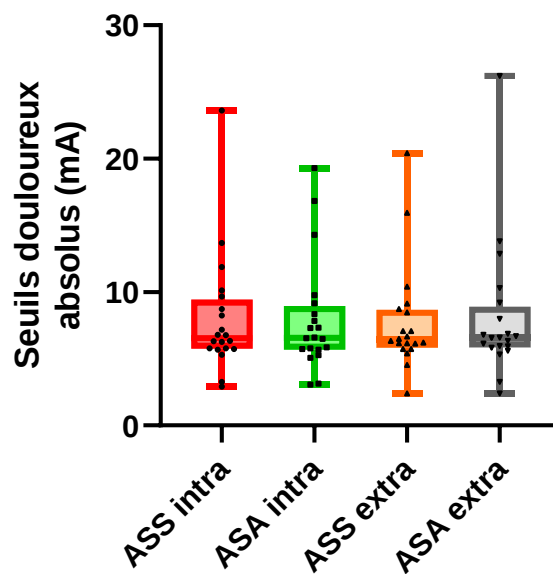


Figure 19 - Comparaison des seuils douloureux en présence d'une sphère synchronisée ou asynchronisée. Les résultats ne montrent aucune différence entre les conditions synchrones (ASS intra et ASS extra) et asynchrones (ASA intra et ASA extra). ASS : avec sphère synchronisée ; ASA : avec sphère asynchronisée ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

L'asynchronie d'une représentation visuelle ne semble donc pas modifier les seuils douloureux par rapport à une représentation visuelle synchronisée aussi bien lorsqu'elle apparaît sur le bras que sur le mur.

Sur les sensations douloureuses subjectives

Comme pour les conditions avec ou sans sphère, nous voulions savoir si la synchronie ou l'asynchronie pouvait moduler subjectivement la sensation douloureuse corporelle. Nous avons comparé les mêmes questions que précédemment pour savoir si les participants estimaient que leur douleur était localisée dans leur bras (**Figure 20A**) ou hors de leur bras (**Figure 20B**).

Les résultats obtenus sont similaires aux résultats précédents. En effet, les moyennes des différentes conditions étaient élevées lorsque les participants estimaient la douleur dans leur bras ($5,2 \pm 1,2$) et faibles lorsqu'ils estimaient la douleur hors de leur bras ($0,7 \pm 1,1$).

Bien qu'aucune différence significative n'ait été montrée entre les conditions, il est intéressant de noter que lorsque les sujets regardaient leur bras et qu'une sphère asynchrone apparaissait, la localisation de la douleur dans le bras diminuait (ASS intra versus ASA intra de la **Figure 20A**). Cette tendance disparaissait toutefois pour la question antagoniste (ASS intra versus ASA intra de la **Figure 20B**).

De même, lorsque les participants regardaient le mur et qu'une sphère synchrone apparaissait, ils surestimaient leur douleur hors de leur bras (ASS extra versus ASA extra de la **Figure 20B**). Cette tendance n'a pas non plus été observée dans la question antagoniste (ASS extra versus ASA extra de la **Figure 20A**).

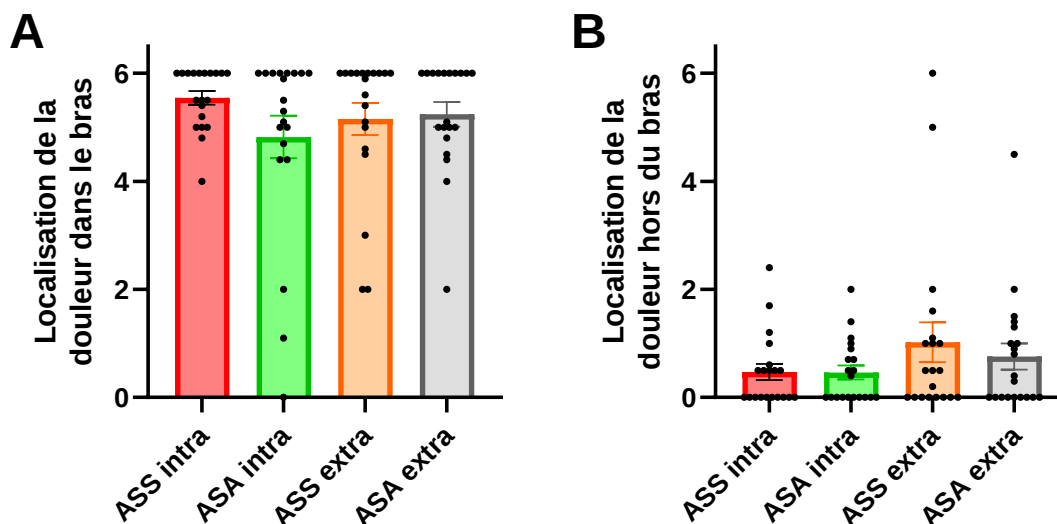


Figure 20 - Comparaison de la localisation subjective de la douleur en fonction de la synchronie ou de l'asynchronie d'une représentation visuelle sur le bras ou sur le mur. La synchronie ou l'asynchronie d'une représentation visuelle sur le bras ou sur le mur ne module pas les réponses des participants concernant la localisation de la douleur dans le bras (**A**) ou hors du bras (**B**). ASS : avec sphère synchronie ; ASA : avec sphère asynchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

L'asynchronie d'une représentation visuelle ne modifie pas la localisation de la douleur dans le bras lorsqu'elle apparaît sur le bras ou sur le mur. Il est néanmoins possible, là encore, qu'elle perturbe légèrement les réponses des participants.

Sur son association à la douleur

Nous voulions également déterminer si les participants considéraient ou non la représentation visuelle comme étant leur douleur. Pour cela, deux questions liées ont été comparées. La première était de savoir si la sphère était considérée par les participants comme étant leur douleur (« J'ai eu l'impression que la sphère rouge était ma douleur ») et la seconde était de savoir si la sphère avait un rapport avec la douleur (« J'ai eu l'impression que la sphère rouge n'avait aucun rapport avec ma douleur »). Comme pour les analyses précédentes, les conditions avec sphère synchronie versus asynchrone sur le bras versus sur le mur ont été comparées.

Les résultats ont montré que lorsqu'une représentation visuelle apparaissait sur le bras de manière synchronie à la stimulation électrique, la sphère était significativement plus associée à la douleur ($p = 0,011$) que dans une condition asynchrone (ASS intra : $3,5 \pm 1,9$ versus ASA

intra : $2,0 \pm 1,7$ de la **Figure 21A**). Les résultats ont montré une tendance identique en conditions extracorporelles même si aucune significativité n'a été trouvée (ASS extra : $2,6 \pm 1,8$ versus ASA extra : $1,8 \pm 1,7$ de la **Figure 21A**).

L'ANOVA à deux facteurs a également montré un effet significatif global du facteur « représentation visuelle : synchronie versus asynchronie » ($F(1,19) = 11,73$; $p = 0,003$). Cela confirme donc le fait que lorsque la sphère est synchrone à la stimulation électrique (sur le bras et sur le mur), l'association de cette sphère à la douleur est supérieure aux conditions où elle apparaît de manière asynchrone (sur le bras et sur le mur).

Bien qu'aucune différence significative n'ait été montrée entre les conditions synchrones et asynchrone lorsque l'on analysait les réponses à la deuxième question (**Figure 21B**), les participants avaient tendance à surévaluer l'absence de rapport de la sphère avec la douleur dans les conditions asynchrones par rapport aux conditions synchrones (ASA intra versus ASS intra et ASA extra versus ASS extra de la **Figure 21B**). En d'autres termes, les participants avaient tendance à percevoir que la sphère était moins liée à la douleur lorsque celle-ci apparaissait de manière asynchrone.

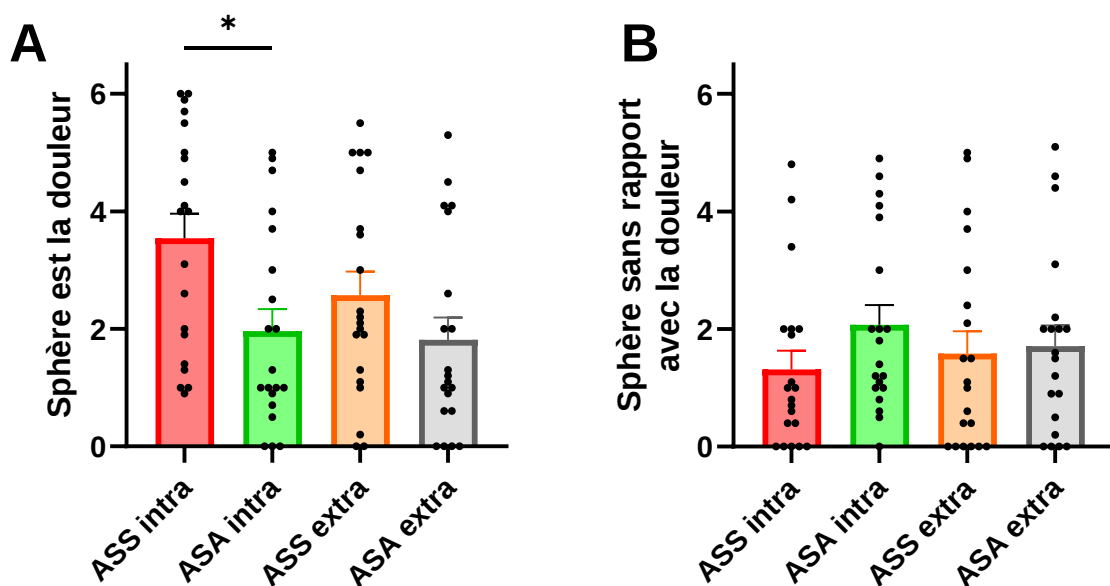


Figure 21 – Comparaison de la synchronie ou l'asynchronie de la représentation visuelle en conditions intracorporelles et extracorporelles. (A) Association de la sphère comme douleur. La sphère est plus associée à la douleur en synchronie qu'en asynchronie lorsqu'elle apparaît sur le bras. **(B) Association de la sphère comme ayant un rapport avec la douleur.** L'association de la sphère comme ayant un rapport avec la douleur est

identique lorsqu'elle est synchrone ou asynchrone et lorsqu'elle apparaît sur le bras ou sur le mur. ASS : avec grossissement synchrone ; ASA : avec grossissement asynchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

D'une part, ces résultats montrent qu'une représentation visuelle synchrone est plus facilement associée à la douleur qu'une représentation visuelle asynchrone. D'autre part, ils montrent également que les participants estiment que la représentation visuelle a un rapport plus important avec la douleur lorsqu'elle apparaît de manière synchrone plutôt qu'asynchrone.

Sur son interprétation comme cause ou conséquence de la douleur

Enfin, nous nous sommes intéressés à l'interprétation que les participants pouvaient donner à la représentation visuelle. Ainsi, deux nouvelles questions antagonistes ont été proposées et comparées entre les conditions où la représentation visuelle était synchrone ou asynchrone et lorsqu'elle était intracorporelle et extracorporelle. La première question était « J'avais l'impression que la douleur était causée par la sphère rouge » et la seconde, « J'avais l'impression que la sphère rouge était causée par la douleur ».

Comme l'illustre la **Figure 22**, les participants estimaient globalement de manière plus importante que la sphère était causée par la douleur ($3,2 \pm 2,0$ de la **Figure 22B**) plutôt que la douleur était causée par la sphère ($1,8 \pm 1,8$ de la **Figure 22A**). Le test de Friedman a montré une différence significative ($p = 0,023$) entre les conditions lorsque les participants estimaient que la douleur était causée par la sphère (**Figure 22A**) mais les tests post-hoc de Dunn n'ont montré aucune différence entre les conditions comparées deux à deux. Une analyse de la variance à mesures répétées a complété ces analyses et a confirmé un effet significatif global du facteur « représentation visuelle : synchronie versus asynchronie » ($F(1,19) = 11,42$; $p = 0,003$) (ASS intra et extra versus ASA intra et extra). Cette différence n'a pas été décelée au niveau local (ASS intra versus ASA intra et ASS extra versus ASA extra) avec le test de Tukey.

Il est intéressant de noter que les participants ont eu tendance à surévaluer le fait que la douleur était causée par la sphère lorsque celle-ci apparaissait de manière synchrone.

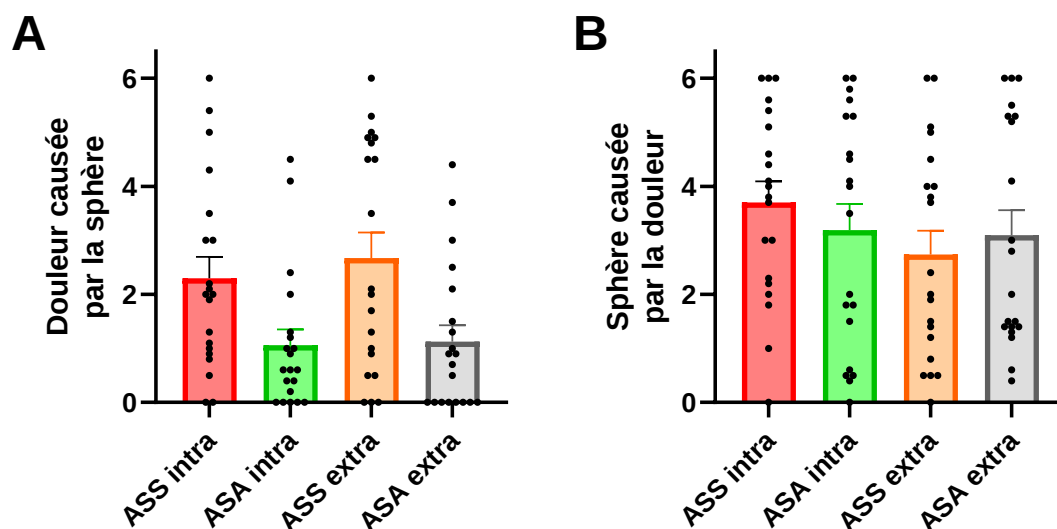


Figure 22 – Comparaison de l’interprétation donnée à la sphère et à la douleur lorsque la représentation visuelle apparaît de manière synchrone et asynchrone sur le bras ou sur le mur. La douleur est surévaluée comme étant causée par la sphère lorsque celle-ci est synchrone. Les niveaux sont toutefois tous inférieurs à 3 sur 6 (A). Les niveaux d’estimation de la sphère comme étant causée par la douleur sont supérieurs à 3 sur 6 mais ne sont pas influencés par la synchronie de la sphère (B). ASS : avec sphère synchrone ; ASA : avec sphère asynchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Ces résultats permettent de conclure que les participants ont l’impression que la sphère est majoritairement causée par la douleur quelles que soient les conditions expérimentales. Les participants estiment également de manière plus importante le fait que la douleur soit causée par la sphère lorsque la représentation visuelle apparaît de manière synchrone.

3.3.2.3. Influence de la localisation d’une représentation visuelle

Enfin, la dernière analyse que nous souhaitons réaliser était d’évaluer plus en détails l’impact de la localisation de la représentation visuelle sur la douleur objective et subjective. Les différentes conditions intracorporelles ont donc été comparées aux différentes conditions extracorporelles.

Comme nous l’avons déjà mentionné précédemment, nos résultats indiquent une absence d’effet de la représentation visuelle sur les seuils douloureux, que ce soit lorsque l’on modifie sa présence ou son absence et son apparition synchrone ou asynchrone à la stimulation. De

plus, l'analyse des questions relatives au fait que la représentation visuelle soit perçue comme une cause ou une conséquence de la douleur n'a également rien montré.

Toutefois, comme l'illustre la **Figure 23**, l'ANOVA rm montre un effet significatif du facteur « emplacement de la représentation visuelle : bras versus mur » pour la question relative à la localisation de la douleur hors du bras ($F(1,19) = 6,50$; $p = 0,024$). Les participants ont en effet surévalué globalement la localisation de la douleur hors de leur bras lorsqu'ils fixaient la sphère sur le mur plutôt que sur leur bras. Cette différence ne s'est néanmoins pas observée à l'échelle locale (ASS intra vers ASS extra et ASA intra vers ASA extra). Il est toutefois important de nuancer ces résultats étant donné que les moyennes des conditions étaient relativement basses ($0,47 \pm 0,6$ pour les conditions intracorporelles et $0,89 \pm 1,4$ pour les conditions extracorporelles).

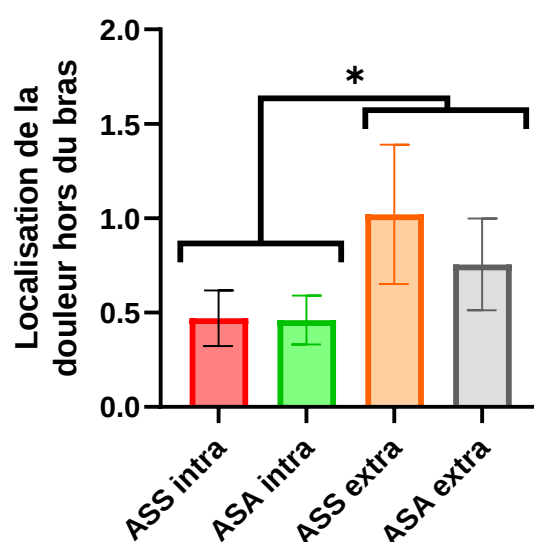


Figure 23 - Influence de la localisation de la représentation visuelle sur l'estimation des participants à localiser leur douleur hors de leur bras. La localisation de la douleur hors du bras est surévaluée lorsque la sphère apparaît sur le mur. ASS : avec sphère synchrone ; ASA : avec sphère asynchrone ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Cette dernière analyse suggère que la douleur est localisée de manière plus importante hors du bras lorsque la représentation visuelle apparaît sur le mur plutôt que sur le bras.

3.4. Discussion

3.4.1. Influence de la présence d'une représentation visuelle sur l'incarnation

Les résultats de cette première étude indiquent que les niveaux d'incarnation étaient élevés dans toutes les conditions intracorporelles et pour tous les participants avec des moyennes supérieures à 4 sur 6. Ces résultats correspondent aux résultats attendus étant donné que les participants étaient colocalisés dans un corps virtuel visible dans sa totalité, que leur point de vue était à la première personne, qu'ils avaient la possibilité de contrôler leurs bras virtuels et enfin, que leur avatar était généré et réaliste. Pour rappel, l'incarnation est définie par quatre composantes principales qui sont la possession corporelle, la localisation de soi, l'agentivité et l'apparence extérieure. Concernant la possession corporelle, plusieurs études ont montré que la simple présence d'un corps virtuel suffisait à induire un sentiment d'appartenance et facilitait l'illusion d'incarnation [122]–[124]. Concernant la localisation du corps virtuel par rapport au corps réel, celle-ci affecte également fortement l'illusion d'incarnation. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le cerveau aurait tendance à s'appuyer fortement sur une vie d'expériences consistant à voir le monde du point de vue de la première personne [114]. Concernant l'agentivité, plusieurs auteurs avancent l'hypothèse qu'une stimulation visuomotrice augmenterait l'incarnation de manière plus efficace qu'une stimulation visuotactile. En effet, la stimulation visuomotrice intervient sur l'agentivité et la propriété corporelle alors que la stimulation visuotactile n'intervient que sur la propriété corporelle [128], [132]. Enfin, en ce qui concerne l'apparence visuelle, elle s'avère également jouer un rôle important dans l'illusion de l'incarnation. Bien que le corps virtuel n'ait pas besoin d'être réaliste pour que l'illusion se produise (mains d'apparence plastique ou membres allongés par exemple) [135]–[137], des études ont montré que des niveaux de réalisme (texture et forme) plus élevés d'une main artificielle amélioraient l'illusion d'incarnation [138]. Dans leur étude, Maselli et Slater ont d'ailleurs confirmé que l'utilisation d'un avatar colocalisé avec le corps réel du participant, positionné à la première personne et avec suivi des mouvements de la tête, était suffisant pour produire une illusion d'incarnation [133].

Nos résultats indiquent que lorsque les participants regardaient leur bras virtuel, ils avaient significativement l'impression d'être mieux localisés dans leur avatar comparativement à

lorsqu'ils regardaient le mur. Ces résultats étaient prévisibles puisque nous estimions que l'absence de vision du corps virtuel entraînerait une perte de repères spatiaux pour les participants. Les mécanismes multisensoriels impliqués dans l'illusion de possession d'un corps se basent principalement sur la vision. Le retour visuel du volume du corps virtuel et de sa localisation jouent en effet un rôle majeur dans les phénomènes d'incarnation [114].

Contrairement à nos attentes, la présence d'une représentation visuelle de taille unique n'a modulé, ni les niveaux d'incarnation, ni ses composantes. Nous envisagions pourtant que la présence d'une représentation visuelle entraînerait des niveaux de possession corporelle, et donc d'incarnation, plus élevés lorsqu'elle était présente sur le bras plutôt qu'absente. En effet, Fusaro et al. ont montré en réalité virtuelle que la présence d'un stimulus douloureux (aiguille) induit un sentiment de possession supérieur en vue à la première personne qu'un stimulus neutre ou agréable [196]. Bien qu'aucune significativité n'ait été montrée, la présence d'une représentation visuelle a bel et bien augmenté les niveaux de propriété corporelle lorsque celle-ci était intracorporelle mais aussi, de manière plus étonnante, lorsqu'elle était extracorporelle. A notre connaissance, aucune étude n'a combiné une stimulation visuotactile à une stimulation visuomotrice d'un membre virtuel pour en étudier les effets sur l'incarnation. Toutefois, de nombreuses études ont montré qu'une stimulation visuotactile synchrone sur un membre virtuel de forme humanoïde, entraîne une appropriation de ce dernier par le participant [112]–[114], [197].

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer l'absence de différences plus importantes entre les conditions. La première viendrait du fait que l'effet de la stimulation visuotactile serait négligeable par rapport à l'effet de la stimulation visuomotrice. En effet, Tsakiris et al., expliquent que les stimulations visuomotrices et visuotactiles reposent sur les principes d'organisation somatotopique de l'homuncule moteur et sensoriel. Le champ récepteur des neurones du cortex somatosensoriel primaire (S1) correspond à une petite zone cutanée alors que le champ récepteur des neurones du cortex moteur primaire (M1) correspond à une zone plus étendue et où la représentation des différentes parties du corps se chevauchent fortement. Ainsi, le cortex moteur primaire serait organisé en représentant des groupes musculaires et des synergies de mouvements plutôt que par des muscles individuels. Les auteurs proposent l'hypothèse que cette organisation reflèterait donc un codage somatotopique discret dans S1 lors d'une stimulation visuotactile. A l'inverse, cela

engendrerait une activation étendue de M1 étant donné que de nombreux muscles sont activés lors d'une stimulation visuomotrice [128]. Des études en IRMf sur le chevauchement des activations évoquées par différents mouvements ont d'ailleurs confirmé cette différence entre les somatotopies motrice et sensorielle. La somatotopie dans S1 est en effet plus discrète et ségréguée alors que la somatotopie dans M1 est plus intégrée et chevauchante [198]. La seconde hypothèse viendrait du fait que les participants observaient une représentation visuelle de taille unique alors que l'intensité électrique augmentait de manière croissante. Il est donc possible que cette incohérence visuotactile ait créé un conflit chez les participants et n'ait pas entraîné une possession corporelle supérieure. Cette dernière hypothèse nous a d'ailleurs conduit à grossir la représentation visuelle de manière cohérente en fonction de l'intensité tactile ressentie dans les études suivantes. Les résultats seront présentés dans les chapitres 2 et 3.

Les résultats n'ont également montré aucun effet de la présence d'une représentation visuelle lorsqu'elle apparaissait sur le mur (extracorporelle) alors que nous attendions à une diminution de la possession corporelle de l'avatar. Nous estimions en effet que ressentir une stimulation tactile (dans le bras) durant l'observation d'une représentation visuelle (en dehors du corps) créerait un conflit chez les participants. Cette hypothèse était toutefois permise à condition que les participants s'approprient la représentation visuelle comme étant leur douleur. Une raison possible de l'absence de résultats peut s'expliquer par le fait que les participants ne se soient pas assez appropriés la représentation visuelle comme étant leur douleur. Ainsi, la représentation visuelle est apparue comme une forme quelconque apparaissant de manière synchrone à leur stimulation. Une autre possibilité viendrait du fait que les participants n'étaient pas acteurs dans l'environnement virtuel mais plutôt passifs étant donné qu'ils observaient seulement la représentation visuelle. Dans l'étude de Malinvaud et al., des patients ont créé un avatar auditif personnalisé de leur propre acouphène. À l'aide d'une baguette, ils déplaçaient leur avatar auditif dans l'environnement virtuel et modulait ainsi le son de l'acouphène en essayant de le rendre le moins dérangeant. L'objectif étant ainsi de contrôler leur propre acouphène pour le rendre supportable [199]. Dans notre expérimentation, une piste possible d'exploration serait donc de créer une représentation visuelle personnalisée de la douleur pour chaque participant avec laquelle il serait possible d'interagir, de manipuler ou de déplacer hors du corps virtuel.

3.4.2. Influence de la présence d'une représentation visuelle sur la douleur

Nos résultats indiquent que les paramètres de la représentation visuelle utilisés dans cette étude n'influencent pas les seuils douloureux évalués par les sujets. Nous nous attendions pourtant d'une part, à une diminution des seuils douloureux (effet « algésique ») lorsque la représentation visuelle apparaissait sur le bras et d'autre part, à une augmentation des seuils douloureux lorsque les participants regardaient leur bras en absence de représentation visuelle. En effet, Longo et al., ont montré qu'observer son bras réel durant une stimulation douloureuse thermique diminuait la douleur [178]. Ces résultats ont été confirmés par Martini avec un bras virtuel [200], [201]. Par ailleurs, dans une autre étude, Martini et al., ont fait apparaître une représentation visuelle de différentes couleurs. Ils ont montré que le bleu diminuait la douleur lors d'une stimulation thermique et que le rouge l'augmentait. Une représentation visuelle présentée en dehors du bras (mais restée dans l'espace péri-personnel) de manière synchrone à la stimulation thermique diminuait de manière significative la douleur par rapport à une représentation visuelle colorée apparaissant sur le bras [189]. Dans notre étude, l'absence de résultats pourrait également s'expliquer par une dispersion trop importante des seuils douloureux obtenus avec les stimulations électriques. Une élévation du nombre de participants permettrait donc de renforcer l'effet statistique pour combler cette dispersion. De nouveau, il est également possible que l'absence de grossissement de la représentation visuelle de manière cohérente à la stimulation électrique ressentie ait eu un impact sur son interprétation, son appropriation et sur les seuils douloureux. D'une manière similaire, la couleur imposée, la texture ou encore la forme, ne reflétaient pas nécessairement la représentation mentale que les participants se faisaient de leur douleur et aurait pu contribuer à rejeter l'hypothèse qu'il s'agissait de leur propre douleur. Dans ce dernier cas, elle n'influencerait donc pas la sensation douloureuse des participants.

3.4.3. Influence de l'asynchronie d'une représentation visuelle sur l'incarnation

Enfin, nos résultats ne montrent aucun effet de l'asynchronie de la représentation visuelle sur les composantes de l'incarnation et la douleur. Cela pourrait principalement venir du délai d'apparition de la représentation visuelle de 200 ms après la stimulation électrique. Lenggenhager al., ont pourtant montré qu'un délai de 200 ms était suffisant pour réduire considérablement l'illusion de possession corporelle du corps virtuel [120]. Ces résultats ont été confirmés dans d'autres études avec des délais de 500 ms ou plus [113], [202]. Toutefois, le délai de discrimination entre un retour visuel et ses propres mouvements ne semblent pas faire consensus dans la littérature. En effet, Franck et al., ont montré que chez des participants sains, un délai de 200 ms était clairement suffisant pour induire une discrimination [203]. Shimada et al., quant à eux, ont montré que 200 ms correspondait au seuil de retard détectable d'une rétroaction visuelle de ses propres mouvements corporels. Ils ont donc suggéré que les entrées visuelles et tactiles pour le traitement du corps doivent être comprises entre 200 ms et 300 ms [204]. Dans le cadre de nos expérimentations, nous nous sommes basés sur un délai de 200 ms étant donné qu'il semblait être suffisant dans certaines études [120] et qu'il correspondait au seuil minimum de détection consciente [204]. Il est toutefois envisageable que ce délai ait été, malgré tout, trop court et que l'asynchronie n'ait pas été perçue par les participants.

Une autre hypothèse possible viendrait du fait que les éléments incongrus ne sont pas ressentis comme incorrectes lorsque l'illusion d'incarnation est forte. En effet, dans leur étude Masseli et Slater ont montré que des participants exposés à une stimulation visuotactile asynchrone peuvent ressentir l'illusion de propriété et percevoir le toucher comme provenant d'un objet entrant en contact avec le corps virtuel [133]. Cet exemple peut être extrapolé à notre condition expérimentale et expliquer l'absence d'effet de l'asynchronie.

3.4.4. Influence de l'asynchronie sur la douleur

D'une manière générale, compte tenu de la grande variabilité intra- et inter-individuelle que nous avons observée dans notre étude, il est possible que l'absence globale de résultats significatifs sur les seuils douloureux puisse aussi s'expliquer par une taille trop faible de notre échantillon.

Toutefois, il est intéressant de noter que la représentation visuelle est plus facilement associée à la douleur (ou comme ayant un rapport avec la douleur) lorsqu'elle est synchrone qu'asynchrone. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'il existe une cohérence entre les stimulations tactiles que les participants ressentent et les stimulations visuelles qu'ils reçoivent.

Il est également intéressant de remarquer que la douleur est estimée de manière plus importante comme étant localisée hors du bras lorsque les participants regardent la représentation visuelle sur le mur (qu'elle soit synchrone ou asynchrone). Là encore, ces résultats peuvent s'expliquer par un conflit multisensoriel entre les sensations tactiles ressenties sur le bras et la représentation visuelle apparaissant sur le mur.

CHAPITRE 2

Étude du grossissement d'une
représentation visuelle sur les seuils
douloureux et l'incarnation

4. Chapitre 2

4.1. Introduction

Comme mentionné dans le chapitre 1, les représentations visuelles ont principalement été utilisées pour étudier leurs effets sur l'incarnation et très peu pour étudier leurs impacts sur la douleur. En effet, concernant l'incarnation, les études utilisent principalement des stimulations tactiles d'intensité unique et des représentations visuelles de taille unique [205]. Concernant la douleur, les intensités douloureuses fluctuent bel et bien alors que les représentations visuelles restent de taille unique [189].

À notre connaissance, et aussi bien pour l'incarnation que pour la douleur, aucune étude ne s'est intéressée à la modulation de la taille de la représentation visuelle lorsque celle-ci est cohérente à l'intensité d'une stimulation tactile.

Dans l'étude 1, la taille de la représentation visuelle était de taille unique quelle que soient les intensités électriques délivrées. L'objectif de cette seconde étude est , cette fois, de faire varier la taille de la représentation visuelle de manière proportionnelle à la stimulation tactile pour en évaluer les conséquences sur l'incarnation et la douleur. Le facteur de grossissement sera également modifié pour étudier l'impact de la vitesse du grossissement sur ces mêmes paramètres.

Nous avons ainsi comparé d'une part, les différences de taille d'une représentation visuelle sur l'incarnation et la douleur et, d'autre part, évalué l'impact de sa localisation dans le corps (intracorporelle) ou hors du corps (extracorporelle).

La première partie de ce chapitre présentera la stratégie expérimentale mise en place dans cette seconde étude. La seconde partie s'intéressera aux résultats obtenus et sera divisée en deux sous-parties avec une présentation des résultats liés à l'incarnation dans un premier temps et à la douleur dans un second temps. Enfin, la dernière partie sera consacrée, quant à elle, à la discussion et à la conclusion de cette étude.

4.2. Stratégie expérimentale de l'étude 2

Les informations présentées dans ce paragraphe concernent exclusivement l'étude 2 et n'ont pas été mentionnées dans la partie « matériels et méthodes » du manuscrit.

Cette étude a reçu un avis favorable du comité de protection des personnes (CPP) Est II (ID RCB 2019-A01990-57).

4.2.1. Participants

35 volontaires (17 hommes et 18 femmes) ont participé à cette étude. La moyenne d'âge était de 25,42 (SD = 4,04 ; min = 19 ; max = 35). Tous les participants se sont portés volontaires et ont donné leur consentement préalable.

4.2.2. Protocole expérimental

Les participants ont passé six conditions expérimentales en réalité virtuelle dans un ordre randomisé (cf. partie « matériels et méthodes » pour plus d'informations).

Le protocole expérimental a également été divisé en deux parties : trois conditions où les participants regardaient leur bras (conditions intracorporelles : **Figures 21A à 24C**) et trois conditions où les participants regardaient le mur (conditions extracorporelles : **Figures 24D à 24F**).

Pour chacun de ces contextes, trois conditions ont été proposées. Dans la première, une représentation visuelle apparaissait de manière synchrone à la stimulation électrique. La taille de la représentation visuelle restait unique (ne grossissait pas) quelle que soit l'intensité électrique délivrée. Elle apparaissait sur le bras dans la condition intracorporelle (Sans Grossissement (SG) intra : **Figure 24A**) et sur le mur dans la condition extracorporelle (SG extra : **Figure 24D**).

Dans la seconde condition, une représentation visuelle apparaissait de manière synchrone à la stimulation électrique. La taille de la représentation visuelle grossissait d'un facteur 1x de manière cohérente à l'intensité électrique délivrée (**Figures 24B et 24E**).

Dans la dernière condition, une représentation visuelle apparaissait de manière synchrone à la stimulation électrique. La taille de la représentation visuelle grossissait d'un facteur 2x de manière cohérente à l'intensité électrique délivrée (**Figures 24C et 24F**).

L'obtention du facteur de grossissement 1x ou 2x est précisé dans la partie « **2.11. Détermination du facteur de grossissement** ».

Les participants avaient pour consigne de ne pas bouger et de fixer la sphère du regard durant toute la durée de l'expérimentation. La représentation visuelle était identique (couleur et forme) quelles que soient les conditions expérimentales et seule la taille variait.

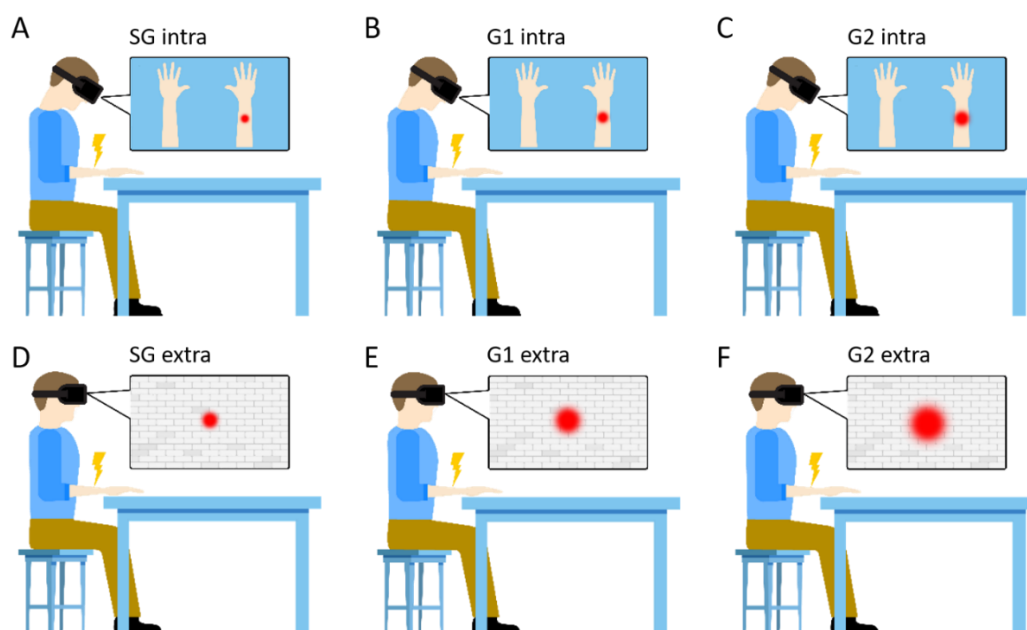


Figure 24 – Schéma du protocole expérimental. (A) Condition avec sphère intracorporelle sans grossissement (SG intra). Les participants regardent leur bras dominant et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur le bras avec une taille unique quelle que soit l'intensité de la stimulation électrique délivrée sur le bras. **(B) Condition avec sphère intracorporelle grossissante d'un facteur 1x (G1 intra).** Les participants regardent leur bras dominant et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur le bras avec un grossissement de facteur 1x de manière cohérente à l'augmentation de l'intensité de la stimulation électrique délivrée sur le bras. **(C) Condition avec sphère intracorporelle grossissante d'un facteur 2x (G2 intra).** Les participants regardent leur bras dominant et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur le bras avec un grossissement de facteur 2x de manière cohérente à l'augmentation de l'intensité de la stimulation électrique délivrée sur le bras. **(D) Condition avec sphère extracorporelle sans grossissement (SG extra).** Les participants regardent le mur et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur le mur avec une taille unique quelle que soit l'intensité de la stimulation électrique délivrée sur le bras. **(E) Condition avec sphère extracorporelle grossissante d'un facteur 1x (G1 extra).** Les participants regardent le mur et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur le mur avec un grossissement de facteur 1x de manière cohérente à l'augmentation de l'intensité de la stimulation électrique délivrée sur le bras. **(F) Condition avec sphère extracorporelle grossissante d'un facteur 2x (G2 extra).** Les participants regardent le mur et une représentation visuelle (sphère) apparaît sur le mur avec un grossissement de facteur 2x de manière cohérente à l'augmentation de l'intensité de la stimulation électrique délivrée sur le bras.

4.3. Résultats

4.3.1. Impact de la représentation visuelle sur l'incarnation

4.3.1.1. Vérification des prérequis

De manière similaire à l'étude 1, un prérequis à l'exploitation des résultats était que tous les sujets soient bien incarnés dans leur avatar. Nous avons donc vérifié que le niveau d'incarnation était supérieur à la moyenne (3 sur 6) pour chaque participant en analysant la répartition (**Figure 25A**) et la distribution (**Figure 25B**) des niveaux d'incarnation de chaque condition expérimentale.

Les résultats ont montré que la dispersion était faible pour tous les participants. Les niveaux d'incarnation étaient tous supérieurs à la moyenne dans les conditions intracorporelles (**Figure 25A**). De manière plus précise, les résultats ont montré que seulement 85% des participants avaient des niveaux d'incarnation supérieurs à 4 sur 6 quelles que soient les conditions expérimentales (**Figure 25B**).

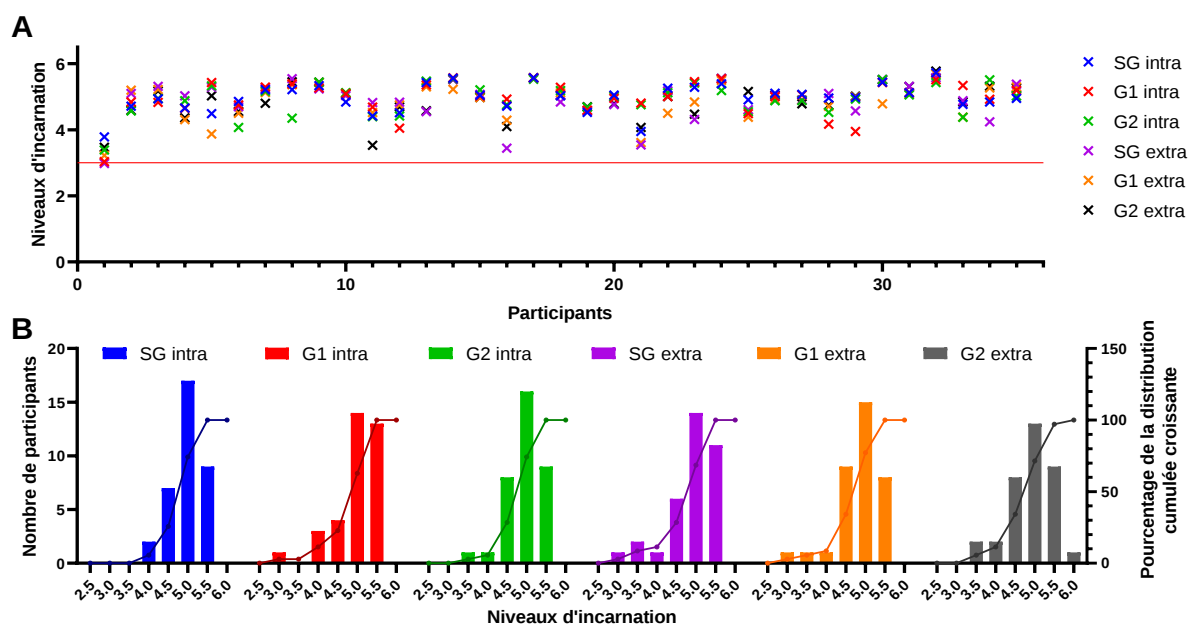


Figure 25 - Répartition et distribution des niveaux d'incarnation pour chaque participant et chaque condition expérimentale. (A) Niveau d'incarnation de chaque participant pour chaque condition. La ligne rouge indique la moyenne seuil de l'incarnation (3 sur 6) au-dessus de laquelle les sujets sont considérés comme bien incarnés. **(B) Distribution du nombre de participants en fonction de leurs scores d'incarnation pour chaque condition (histogramme).** Le pourcentage de la distribution cumulée croissante est présenté sur le même graphique et indiqué par les points reliés (échelle de droite). SG : sans grossissement ; G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Ces résultats montrent que les niveaux d'incarnation étaient élevés pour l'ensemble des participants.

4.3.1.2. Influence du grossissement d'une représentation visuelle

Nous voulions étudier l'impact du grossissement de la représentation visuelle d'une stimulation électrique sur les différentes composantes de l'incarnation : les niveaux d'agentivité, de possession, de localisation de soi, d'apparence extérieure et sur l'incarnation elle-même.

Les conditions où la sphère apparaissait sans grossir (SG) ont été comparées à celles où la sphère apparaissait avec un grossissement variable. Ces comparaisons ont été effectuées pour les tailles de grossissement de facteur 1x (G1) et facteur 2x (G2) sur le bras (intracorporelle) et sur le mur (extracorporelle).

Concernant le facteur de grossissement 1x, et comme indiqué dans le **Tableau VII**, les résultats ont montré de manière générale que les niveaux d'agentivité (**Figure 26A**), de possession (**Figure 26B**) et de localisation de soi (**Figure 26C**) étaient élevés alors que les niveaux d'apparence extérieure (**Figure 26D**) étaient plus faibles. L'ensemble de ces composantes ont permis d'obtenir des niveaux élevés d'incarnation (**Figure 26E**). Les analyses n'ont montré aucune différence significative entre les conditions ni pour l'incarnation, ni pour ses composantes.

Tableau VII - Résumé des moyennes et des écarts-types de l'incarnation et de ses composantes en fonction de l'absence ou de la présence d'un grossissement de la représentation visuelle en conditions intracorporelles ou extracorporelles. SG : sans grossissement ; G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

	SG intra	G1 intra	G2 intra	SG extra	G1 extra	G2 extra
Agentivité	5,27	5,24	5,15	5,48	5,24	5,37
	± 0,68	± 0,69	± 0,84	± 0,60	± 0,83	± 0,67
Possession corporelle	5,25	5,28	5,28	4,96	4,97	4,97
	± 0,67	± 0,66	± 0,66	± 1,11	± 0,95	± 0,95
Localisation de soi	5,43	5,40	5,40	5,28	5,40	5,40
	± 0,71	± 0,84	± 0,84	± 0,75	± 0,73	± 0,73
Apparence extérieure	2,84	2,88	2,88	2,81	2,69	2,69
	± 0,92	± 0,88	± 0,88	± 0,98	± 0,86	± 0,86
Incarnation	4,96	4,96	4,96	4,89	4,84	4,84
	± 0,42	± 0,54	± 0,54	± 0,61	± 0,55	± 0,55

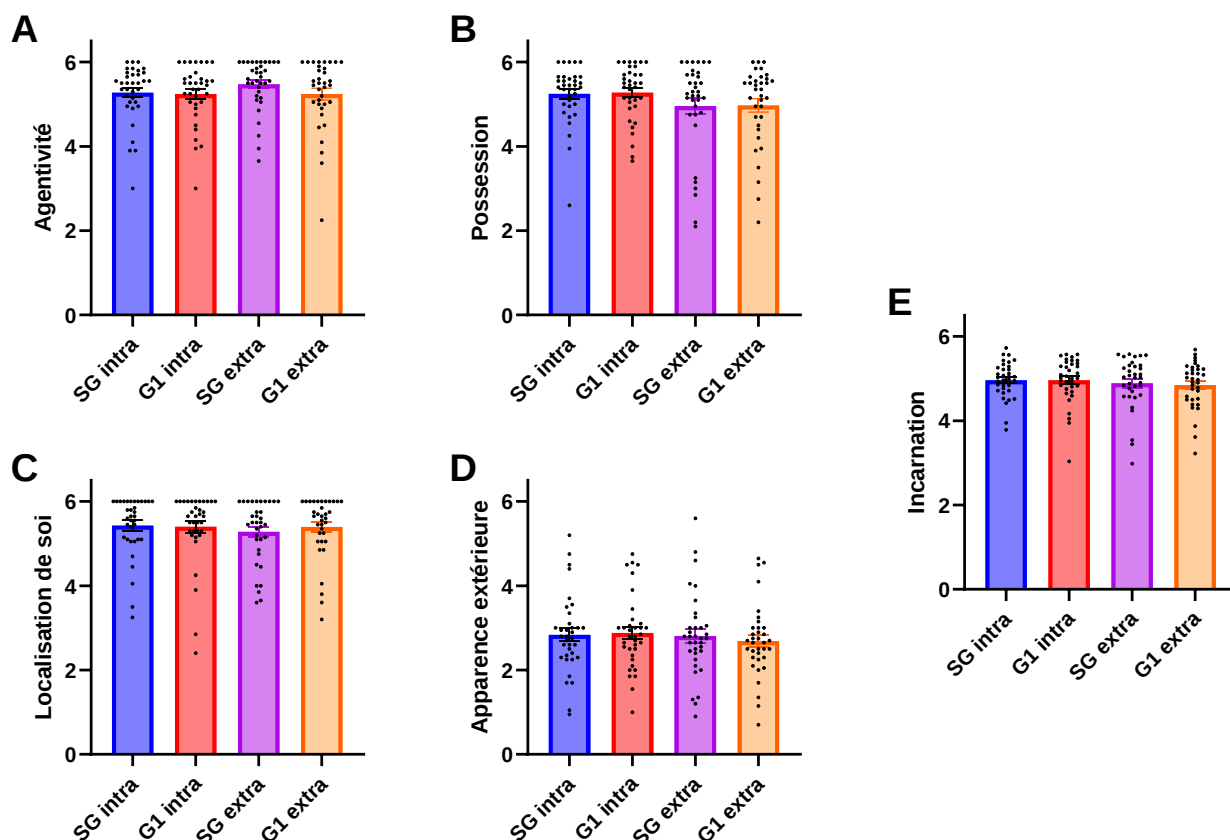


Figure 26 – Impact de l’absence ou de la présence d’un grossissement de facteur 1x d’une représentation visuelle sur les différentes composantes de l’incarnation, en conditions intracorporelles et extracorporelle. La présence d’un grossissement 1x de la représentation visuelle ne modifie pas les niveaux d’agentivité (A), de possession corporelle (B), de localisation de soi (C), d’apparence extérieure (D) et d’incarnation (E). SG : sans grossissement ; G1 : grossissement de facteur 1x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Concernant le facteur de grossissement 2x, et comme indiqué dans le **Tableau VII**, les niveaux d’agentivité (**Figure 27A**), de possession (**Figure 27B**) et de localisation de soi (**Figure 27C**) étaient également très élevés et les niveaux d’apparence extérieure (**Figure 27D**) étaient plus faibles. De nouveau, les niveaux globaux d’incarnation étaient très élevés lorsque l’on comparait les conditions sans grossissement et avec un grossissement 2x. Les tests de Friedman montraient une différence significative globale pour l’agentivité ($p = 0,004$). Cependant, les analyses post-hoc n’ont pas permis de montrer de différence entre les conditions comparées deux à deux. Aucune différence n’a été montrée concernant l’incarnation et les autres composantes de l’incarnation.

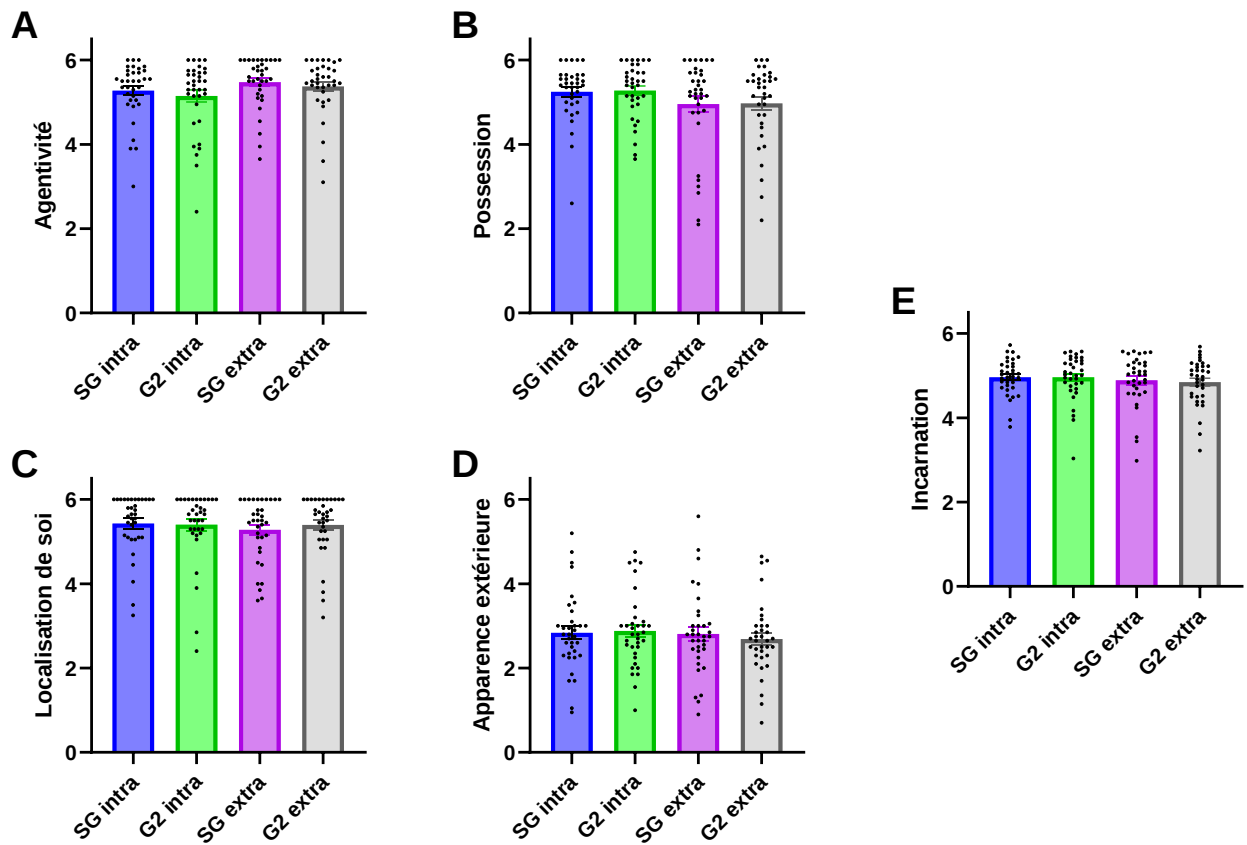


Figure 27 - Impact de l'absence ou de la présence d'un grossissement de facteur 2x d'une représentation visuelle sur les différentes composantes de l'incarnation, en conditions intracorporelles et extracorporelle. La présence d'un grossissement 2x de la représentation visuelle ne modifie pas les niveaux d'agentivité (A), de possession corporelle (B), de localisation de soi (C), d'apparence extérieure (D) et d'incarnation (E). SG : sans grossissement ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Le grossissement d'une représentation visuelle ne semble donc pas modifier les niveaux d'incarnation.

4.3.1.3. Influence de la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle

Nous voulions également déterminer si la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle modulait les niveaux d'agentivité, de possession, de localisation de soi, d'apparence extérieure et d'incarnation. Ainsi, nous avons donc comparé les conditions où la représentation visuelle grossissait d'un facteur 1x (G1) avec celles où elle grossissait d'un facteur 2x (G2) à la fois sur le bras (intracorporelle) et sur le mur (extracorporelle).

Les analyses n'ont montré aucune différence significative entre les conditions ni pour l'incarnation (**Figure 28E**), ni pour ses composantes (**Figures 28A à 28D**).

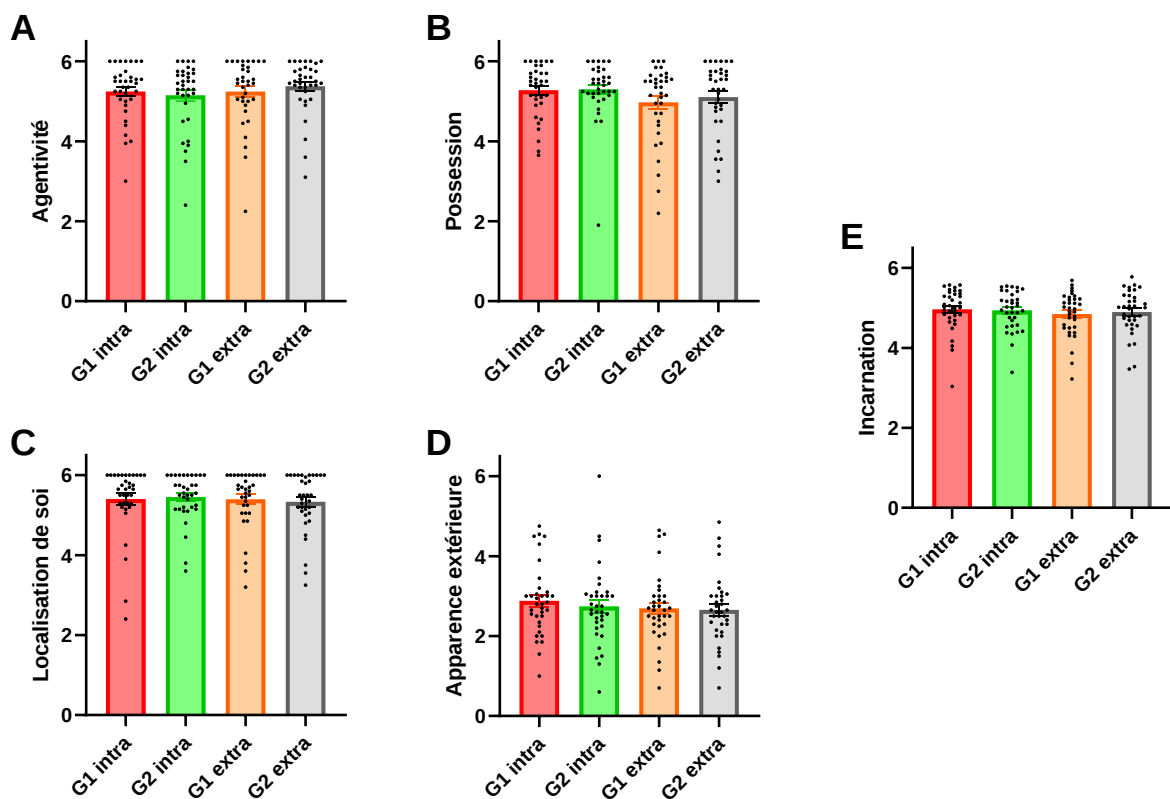


Figure 28 - Impact de la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle sur les différentes composantes de l'incarnation, en conditions intracorporelles et extracorporelles. La vitesse de grossissement de la représentation visuelle ne modifie pas les niveaux d'agentivité (A), de possession corporelle (B), de localisation de soi (C), d'apparence extérieure (D) et d'incarnation (E). G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

La vitesse de grossissement de la représentation visuelle ne semble donc pas moduler les niveaux d'incarnation.

4.3.1.4. Influence de la localisation d'une représentation visuelle grossissante

Il était intéressant de déterminer également si la localisation de la représentation visuelle sur le bras ou sur le mur avait un impact sur les niveaux d'incarnation. Pour cela, nous avons analysé les composantes de l'incarnation en conditions intracorporelles et extracorporelles lorsque la sphère ne grossissait pas (SG) ou lorsqu'elle grossissait d'un facteur 1x (G1) ou d'un facteur 2x (G2).

Les tests de Friedman ont montré une différence significative globale ($p = 0,004$) pour la vitesse de grossissement (G1 versus G2). Une analyse de la variance à mesures répétées (ANOVA rm) à deux facteurs a complété l'analyse et a confirmé un effet significatif global du facteur « emplacement de la représentation visuelle : intracorporelle versus extracorporelle » ($F(1,35) = 7,055$; $p = 0,012$). Les analyses des différentes composantes de l'incarnation révèlent que les niveaux d'agentivité étaient plus élevés lorsque la sphère grossissante apparaissait sur le mur plutôt que sur le bras (G1 intra + G2 intra versus G1 extra + G2 extra ; **Figure 29**). Les analyses post-hoc n'ont toutefois pas montré de différence à l'échelle locale entre les conditions prises deux à deux. Autrement dit, à l'échelle locale, les niveaux d'agentivité ne sont pas supérieurs lorsque le grossissement de facteur 1x apparaît sur le mur par rapport au bras au même facteur (G1 intra versus G1 extra) et de manière identique pour le facteur 2x (G2 intra versus G2 extra).

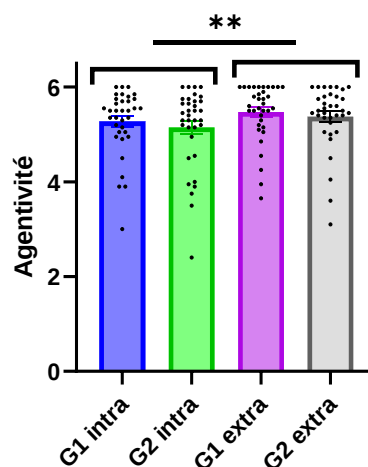


Figure 29 – Comparaison des conditions intracorporelles et extracorporelles des vitesses de grossissement de facteurs 1x et 2x. La vitesse de grossissement d'une représentation visuelle apparaissant sur le mur augmente les niveaux d'agentivité par rapport à une représentation visuelle apparaissant sur le bras. G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

La présence d'une représentation visuelle grossissante augmente les niveaux d'agentivité lorsqu'elle apparaît sur le mur plutôt que sur le bras du participant.

4.3.2. Impact de la représentation visuelle sur la douleur

4.3.2.1. Influence du grossissement d'une représentation visuelle

Sur l'évaluation des seuils douloureux

Nous voulions déterminer si le grossissement d'une représentation visuelle pouvait moduler la douleur de manière objective. Nous avons donc comparé les seuils douloureux des conditions sans grossissement et avec grossissement de facteur 1x et de facteur 2x.

Aucune différence significative n'a été observée entre les conditions sans et avec grossissement de facteur 1x (**Figure 30A**) et entre les conditions sans et avec grossissement de facteur 2x (**Figure 30B**).

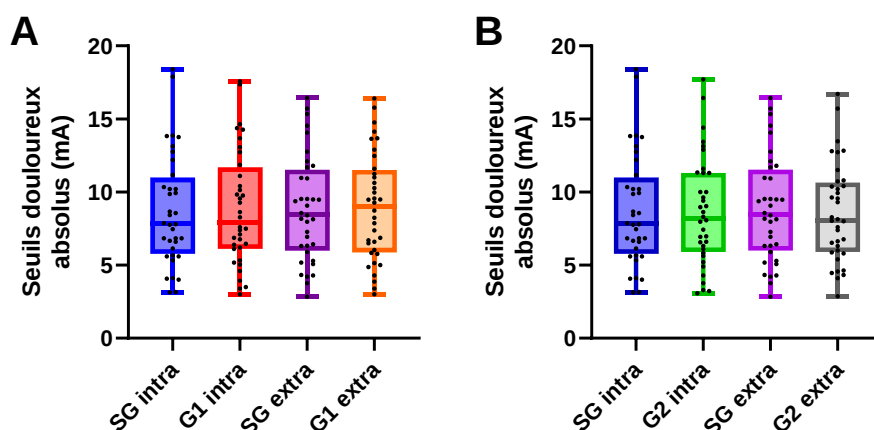


Figure 30 - Influence du grossissement de la représentation visuelle sur les seuils douloureux. La vitesse de grossissement de facteur 1 (**A**) et de facteur 2 (**B**) ne module pas les seuils douloureux. SG : sans grossissement ; G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Le grossissement d'une représentation visuelle ne semble donc pas moduler les seuils douloureux par rapport à une absence de grossissement.

Sur les sensations douloureuses

Nous voulions également déterminer si la présence d'une représentation visuelle pouvait moduler subjectivement la sensation douloureuse en exploitant les réponses aux questions en lien avec la sensation douloureuse. Nous avons ainsi comparé les moyennes des réponses relatives à la localisation de la douleur pour les conditions sans ou avec grossissement de facteur 1x (**Figure 31**) et de facteur 2x (**Figure 32**) dans le bras ou hors du bras. Les questions antagonistes étaient « J'ai eu l'impression que la douleur était dans mon bras » et « J'ai eu l'impression que la douleur était hors de mon bras ». Les scores moyens des différentes questions sont représentés dans le **Tableau VIII** ci-dessous.

Tableau VIII – Scores (moyennes $\pm$ écarts-types) des réponses aux questions relatives à la représentation visuelle en fonction de l'absence ou la présence d'un grossissement de la représentation visuelle en conditions intracorporelles ou extracorporelles. SG : sans grossissement ; G1 : avec grossissement de facteur 1x ; G2 : avec grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Questions	SG intra	G1 intra	G2 intra	SG extra	G1 extra	G2 extra
Localisation douleur dans le bras	5,85 $\pm 0,37$	5,62 $\pm 0,87$	5,76 $\pm 0,51$	5,81 $\pm 0,38$	5,74 $\pm 0,52$	5,53 $\pm 1,09$
Localisation douleur hors du bras	0,22 $\pm 0,49$	0,29 $\pm 0,56$	0,24 $\pm 0,47$	0,24 $\pm 0,47$	0,59 $\pm 1,24$	0,57 $\pm 1,10$
Sphère est la douleur	2,61 $\pm 1,84$	3,02 $\pm 2,15$	3,69 $\pm 1,98$	1,73 $\pm 1,77$	1,90 $\pm 1,81$	2,35 $\pm 1,73$
Sphère est sans rapport avec la douleur	2,09 $\pm 1,89$	1,77 $\pm 1,94$	0,96 $\pm 1,40$	2,71 $\pm 2,07$	2,25 $\pm 2,08$	1,86 $\pm 1,89$
Sphère causée par la douleur	2,93 $\pm 2,27$	3,11 $\pm 2,35$	3,27 $\pm 2,28$	2,16 $\pm 2,02$	2,28 $\pm 2,10$	2,46 $\pm 2,07$
Douleur causée par la sphère	1,67 $\pm 1,98$	1,83 $\pm 1,84$	1,93 $\pm 1,92$	1,57 $\pm 1,99$	1,42 $\pm 1,77$	1,67 $\pm 1,79$

Conditions sans grossissement versus avec grossissement de facteur 1x

Les tests de Friedman n'ont montré aucune différence significative entre les conditions sans ou avec grossissement de facteur 1x concernant la localisation de la douleur dans le bras (**Figure 31A**) ou hors du bras (**Figure 31B**). Toutefois, une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a complété l'analyse et a montré un effet significatif ($F(1,34) = 6,394$; $p = 0,016$) du facteur « représentation visuelle : sans grossissement versus grossissement 1x » pour la localisation de la douleur dans le bras (**Figure 31A**) et une tendance ($F(1,34) = 3,853$; $p = 0,058$) du même facteur pour la localisation de la douleur hors du bras (**Figure 31B**).

Les résultats ont montré que lorsque la représentation visuelle grossissait sur le bras, les participants sous-estimaient de manière globale la douleur dans le bras par rapport à une absence de grossissement (G1 versus SG ; **Figure 31A**). Les analyses post-hoc n'ont toutefois pas montré de différence significative à l'échelle locale, autrement dit, lorsque les conditions sont comparées deux à deux (SG intra versus G1 intra et SG extra versus G1 extra).

De la même façon, lorsque la représentation visuelle grossissait sur le mur, et bien que les moyennes soient faibles (inférieures à 1 sur 6), les participants ont eu tendance à surestimer la douleur hors de leur bras (G1 versus SG ; **Figure 31B**).

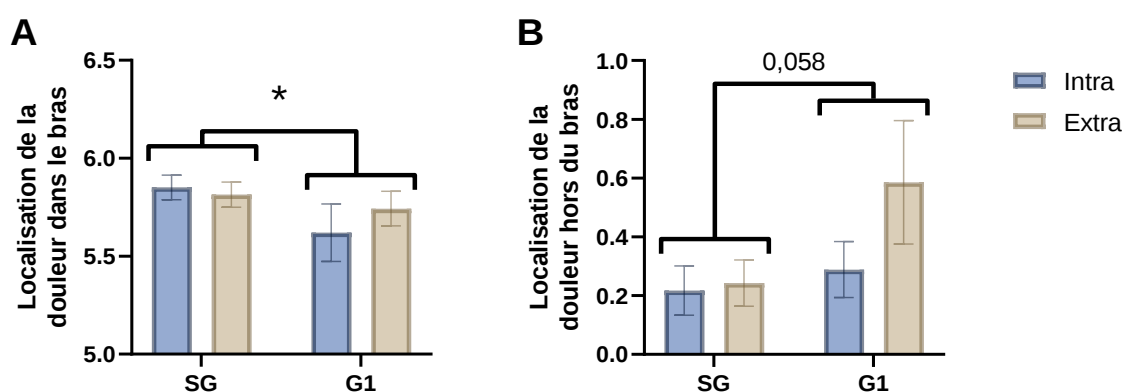


Figure 31 – Comparaison de l'évaluation de la localisation subjective de la douleur en absence ou en présence de grossissement de facteur 1x. La douleur dans le bras est sous-évaluée lorsque le grossissement de la représentation visuelle est d'un facteur 1x (**A**). La douleur a tendance à être surévaluée comme étant hors du bras lorsque le grossissement de la représentation visuelle est d'un facteur 1x (**B**). SG : sans grossissement ; G1 : grossissement de facteur 1x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Conditions sans grossissement versus avec grossissement de facteur 2x

Les tests de Friedman ont montré une différence significative ($p = 0,025$) lorsque la localisation de la douleur était estimée dans le bras bien que les comparaisons post-hoc n'aient montré aucune différence entre les conditions prises deux à deux (**Figure 32A**). Aucune différence n'a été observée pour la localisation de la douleur hors du bras.

Il est intéressant de noter que la tendance observée avec le grossissement de facteur 1x s'est confirmée avec le facteur 2x lorsque l'évaluation de la localisation était évaluée hors du bras. En effet, une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a confirmé un effet significatif global ($F(1,34) = 6,656$; $p = 0,014$) du facteur « représentation visuelle : sans grossissement versus grossissement 2x » (SG intra + G2 intra versus SG extra + G2 extra) bien que ces différences ne soient pas apparues au niveau local (SG intra versus G1 intra et SG extra versus G1 extra) (**Figure 32B**).

Lorsque les participants regardaient la sphère grossir avec un facteur 2x, ils surévaluaient la douleur hors du bras. Il est intéressant de noter que, comme observé pour le grossissement 1x, les moyennes restaient également faibles dans ces conditions de grossissement 2x (inférieures à 1 sur 6).

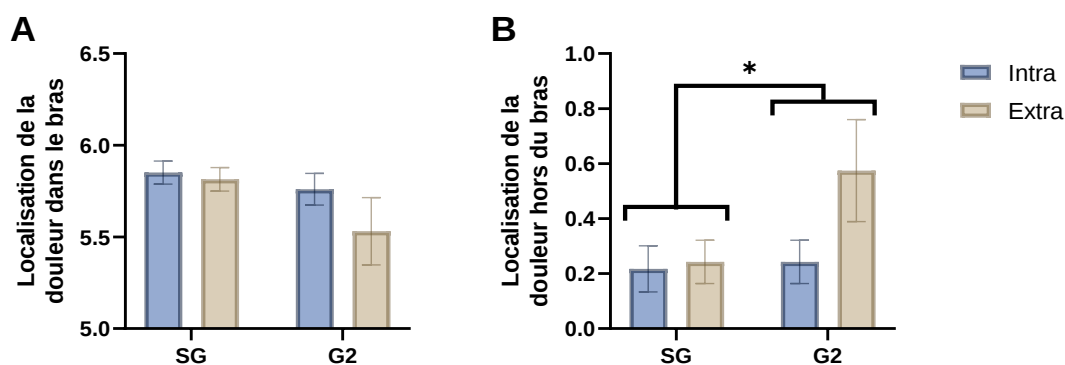


Figure 32 - Comparaison de l'évaluation de la localisation subjective de la douleur en absence ou en présence de grossissement de facteur 2x. La localisation de la douleur dans le bras est identique en présence ou en absence de grossissement de facteur 2x (**A**). La douleur hors du bras est surévaluée lorsque la sphère grossit d'un facteur 2x (**B**). SG : sans grossissement ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Les participants ont moins eu l'impression que la douleur était dans leur bras lorsque la sphère grossissait d'un facteur 1x. Cette observation n'a toutefois pas été montrée pour le grossissement de facteur 2x. Par ailleurs, les participants ont plus eu l'impression que la douleur était hors de leur bras lorsque la sphère grossissait sur le mur.

Sur son association à la douleur

Il nous a semblé également pertinent de savoir si les participants associaient leur douleur à la représentation visuelle. Nous avons comparé deux questions liées. La première était de savoir si la sphère était considérée par les participants comme étant leur douleur (« J'ai eu l'impression que la sphère rouge était ma douleur ») et la seconde était de savoir si la sphère avait un rapport avec la douleur (« J'ai eu l'impression que la sphère rouge n'avait aucun rapport avec ma douleur »). Les réponses ont été comparées en absence et en présence de grossissement de facteurs 1x et 2x lorsque la sphère apparaissait sur le mur ou sur le bras.

Conditions sans grossissement versus avec grossissement de facteur 1x

Les tests de Friedman ont montré qu'il existait des différences significatives entre les conditions lorsque les participants évaluaient la sphère comme étant leur douleur ($p < 0,0001$) et lorsqu'ils évaluaient la sphère sans rapport avec leur douleur ($p = 0,016$). Les comparaisons deux à deux n'ont cependant montré aucune différence lors des analyses post-hoc (**Figure 33**).

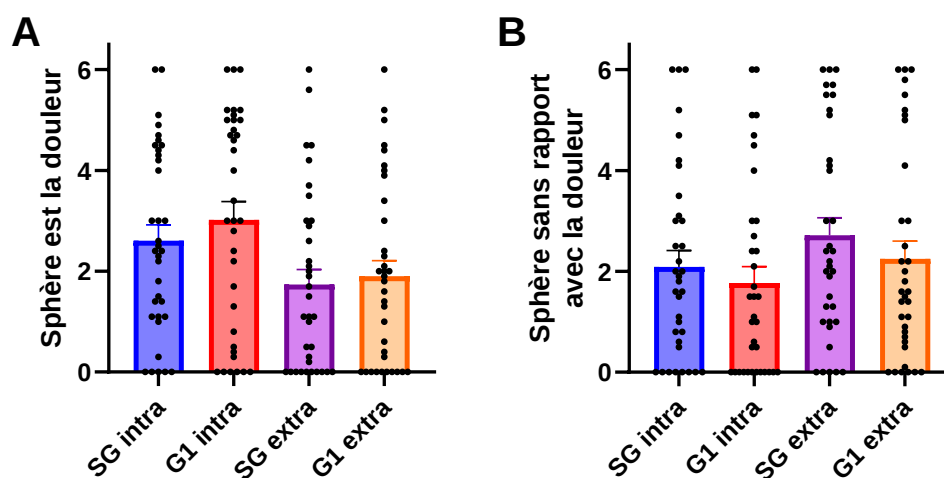


Figure 33 – Association de la représentation visuelle comme douleur ou comme ayant un rapport avec la douleur. Le grossissement d'un facteur 1x de la sphère n'entraîne pas une meilleure association de la sphère à la douleur **(A)** ni un meilleur rapport avec la douleur **(B)**. SG : sans grossissement ; G1 : avec grossissement de facteur 1x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

Conditions sans grossissement versus avec grossissement de facteur 2

Concernant les comparaisons avec le grossissement de facteur 2x, le test de Friedman a également montré des différences significatives lorsque la sphère était associée à la douleur ($p < 0,0001$; **Figure 34A**) et lorsqu'elle était estimée sans rapport avec la douleur ($p < 0,0001$; **Figure 34B**). Les analyses post-hoc ont montré une tendance entre les conditions sans grossissement et avec grossissement intracorporelle ($p = 0,065$) pour la première question (SG intra versus G2 intra de la **Figure 34A**). Des différences significatives sont toutefois apparues entre les conditions sans grossissement et avec grossissement dans les conditions intracorporelle ($p = 0,050$) et extracorporelle ($p = 0,028$) pour la première question (**Figure 34B**).

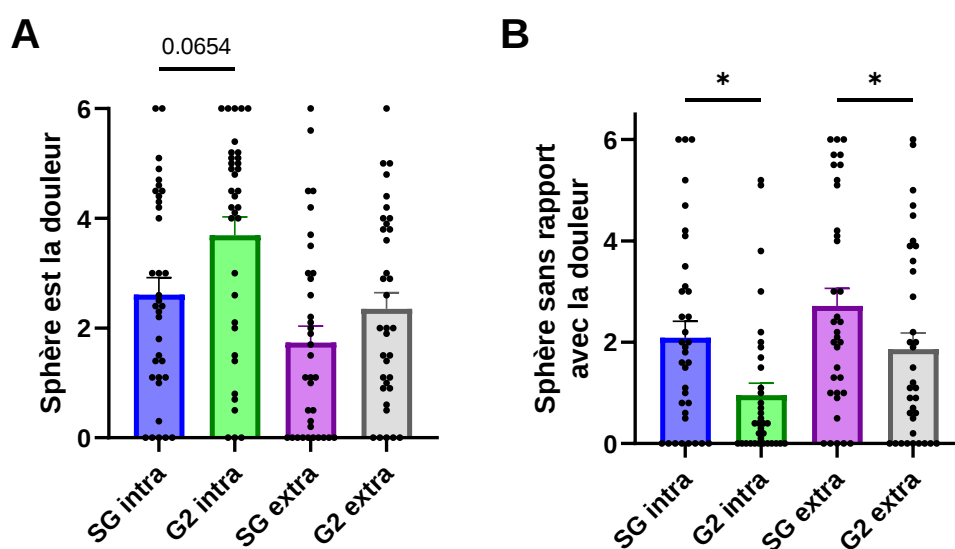


Figure 34 – Association de la représentation visuelle comme douleur ou comme ayant un rapport avec la douleur. (A) Association de la sphère comme étant la douleur. (B) Association de la sphère comme n'ayant pas de rapport avec la douleur. SG : sans grossissement ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Les participants ont donc estimé que la sphère grossissante de facteur 2x avait un rapport avec leur douleur lorsqu'elle apparaissait sur le bras et sur le mur mais qu'elle n'était concrètement pas leur douleur (bien qu'une tendance soit apparue lorsqu'elle apparaît sur le bras).

Ces résultats n'ont toutefois pas été observés pour le grossissement de facteur 1x.

Sur son interprétation comme cause ou conséquence de la douleur

Nos précédents résultats indiquent que les participants estimaient que la représentation visuelle avait un rapport avec la douleur. Par conséquent, nous voulions déterminer plus précisément si les participants voyaient la sphère comme une cause ou une conséquence de la douleur. Les scores des réponses aux questions « J'avais l'impression que la douleur était causée par la sphère rouge » et « J'avais l'impression que la sphère rouge était causée par la douleur » ont été comparées dans les conditions intracorporelles et extracorporelles en fonction des conditions sans et avec grossissement de facteurs 1x et 2x.

D'une manière générale, les participants ont plus fortement estimé que la sphère était causée par la douleur plutôt que l'inverse (i.e. que la douleur était causée par la sphère) (**Figure 35A** versus **Figure 35B**). Pour plus de précisions, les résultats sont présentés dans le **Tableau VIII**. Le test de Friedman a révélé une différence significative globale ($p = 0,014$) lorsque les participants estimaient que la sphère était causée par la douleur bien que les analyses post-hoc n'indiquent aucune différence entre les conditions avec ou sans grossissement sur le bras ou sur le mur (**Figure 35A**). Aucune différence n'a été montrée lorsque les participants estimaient que la douleur était causée par la sphère (**Figure 35B**).

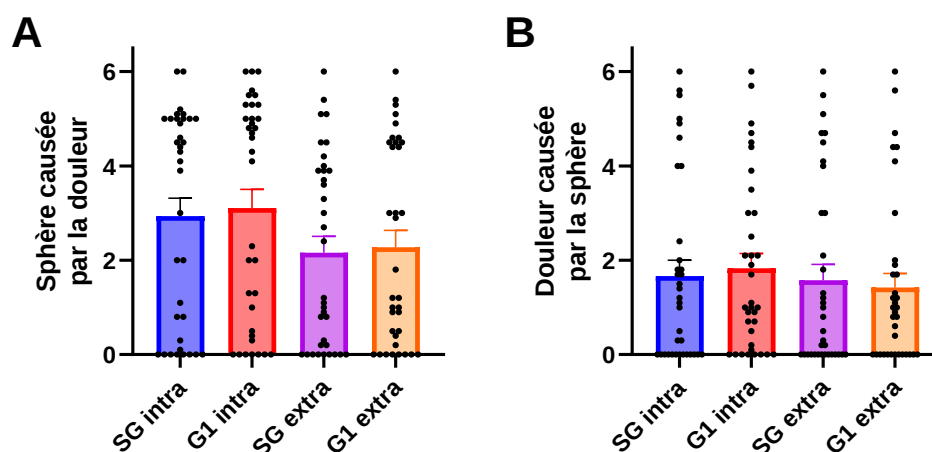


Figure 35 - Comparaison des niveaux d'association de la sphère comme étant la douleur ou sans rapport avec la douleur lorsque la représentation visuelle apparaît sans ou avec un grossissement de facteur 1x sur le bras ou sur le mur. Les participants n'ont pas estimé de manière supérieure que la sphère était causée par la douleur lorsque la sphère grossissait d'un facteur 1x (**A**) ou que la douleur était causée par la sphère (**B**). SG : sans grossissement ; G1 : avec grossissement de facteur 1x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

De manière similaire au grossissement de facteur 1x, le test de Friedman a montré une différence significative globale ($p = 0,006$) lorsque les participants estimaient que la sphère était causée par la douleur entre les conditions sans ou avec grossissement de facteur 2x intracorporelles et extracorporelles (**Figure 36A**). Les analyses post-hoc n'ont pas confirmé ces différences entre les conditions prises deux à deux. Aucune différence n'a été montrée lorsque les participants ont estimé que la douleur était causée par la sphère (**Figure 36B**).

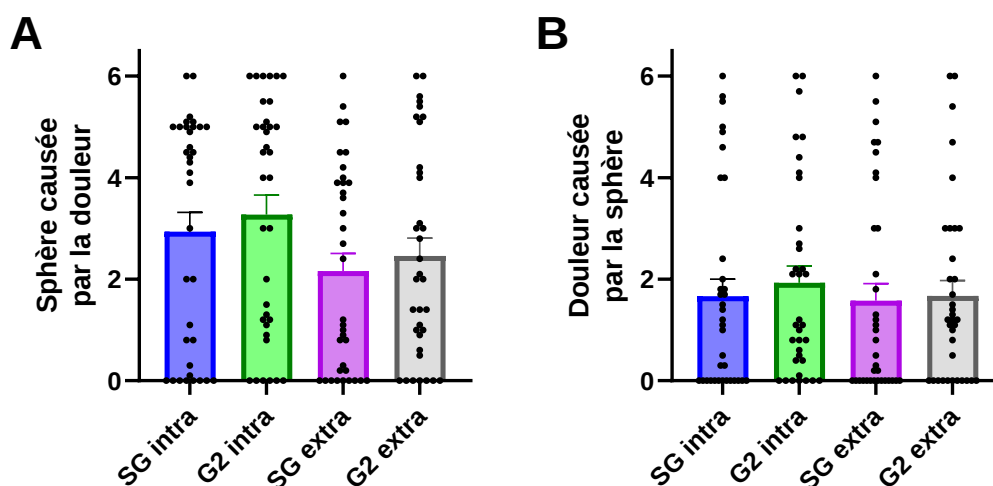


Figure 36 - Comparaison des niveaux d'association de la sphère comme étant la douleur ou sans rapport avec la douleur lorsque la représentation visuelle apparaît sans ou avec un grossissement de facteur 2x sur le bras ou sur le mur. Les participants n'ont pas estimé de manière supérieure que la sphère était causée par la douleur lorsque la sphère grossissait d'un facteur 2x (**A**) ou que la douleur était causée par la sphère (**B**). SG : sans grossissement ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

De manière générale, les participants ont estimé de manière plus importante que la sphère était causée par la douleur plutôt que l'inverse. Ces estimations restaient toutefois modérées et l'absence de grossissement ou le grossissement de la sphère n'a eu aucun impact sur ces évaluations.

4.3.2.2. Influence de la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle

Sur l'évaluation des seuils douloureux objectifs

Nous voulions également déterminer si la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle pouvait moduler la douleur. Les seuils douloureux ont donc été comparés entre les différents grossissements à la fois en conditions intracorporelles et extracorporelles (**Figure 37**).

Les analyses de Friedman n'ont montré aucune différence significative entre les grossissements G1 et G2 lorsque la représentation visuelle apparaissait sur le bras ou sur le mur. Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a complété ces analyses. Le premier facteur était la « vitesse de grossissement » et le second facteur était la « localisation de la représentation visuelle : bras versus mur ». Nous avons ainsi pu montrer un effet significatif global ($F(1,35) = 4,233$; $p = 0,047$) pour le premier facteur. En effet, nos résultats indiquent que les seuils douloureux diminuaient (effet « algésique ») lorsque la sphère grossissait d'un facteur 2x par rapport à un facteur 1x (G2 intra + G2 extra versus G1 intra + extra).

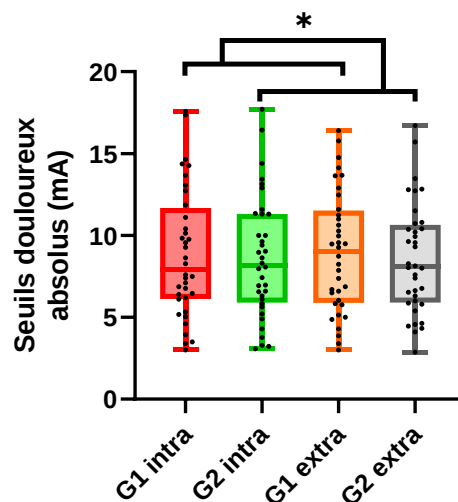


Figure 37 – Influence de la vitesse de grossissement de la représentation visuelle sur les seuils douloureux. La vitesse de grossissement module les seuils douloureux. G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Nos résultats suggèrent que la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle peut moduler la douleur. En effet, plus la représentation visuelle grossit rapidement et plus les seuils douloureux diminuent (effet algésique).

Sur les sensations douloureuses subjectives

Étant donné que les seuils douloureux sont modulés par la vitesse de grossissement de la représentation visuelle, il est pertinent, à présent, de s'interroger sur le fait qu'elle puisse ou non moduler la sensation douloureuse subjective des participants. Ainsi, les réponses aux questions relatives à la localisation de la douleur dans le bras ont été analysées et comparées entre les conditions.

D'une manière générale, la localisation de la douleur a très bien été perçue comme étant localisée dans le bras (moyennes supérieures à 5 sur 6) et très peu comme étant localisée hors du bras (moyennes inférieures à 0,6 sur 6). Aucune différence significative n'est toutefois apparue entre les conditions grossissantes (G1 versus G2) pour chacune des questions antagonistes lorsque la sphère apparaissait sur le bras et sur le mur (**Figure 38**).

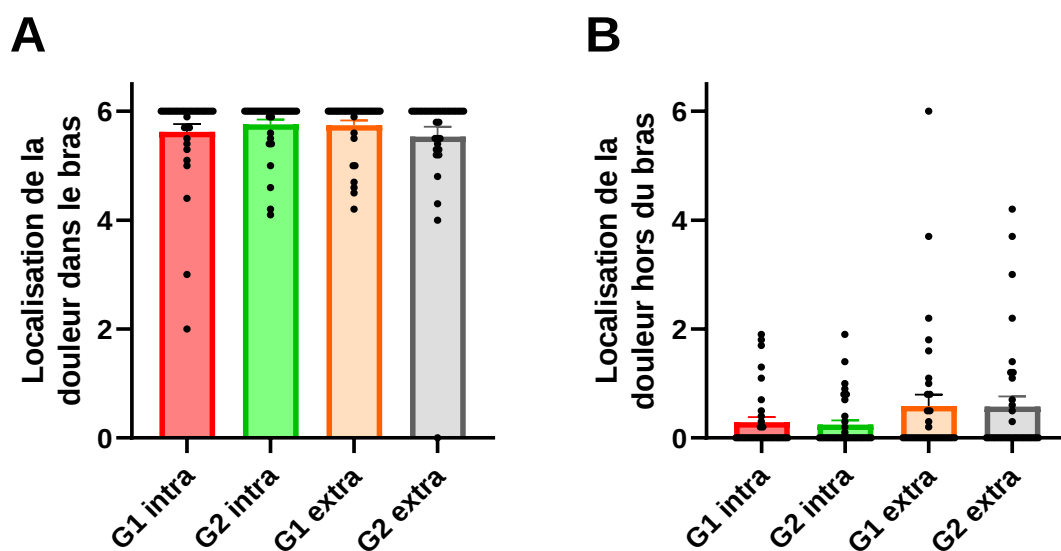


Figure 38 – Comparaison des localisations de la douleur en fonction de la vitesse de grossissement de la représentation visuelle. (A) Les participants estiment de manière importante que la douleur est localisée dans leur bras quelle que soit la vitesse de grossissement de la représentation visuelle et sa localisation. Aucune différence significative n'apparaît toutefois entre les conditions. **(B)** A l'inverse, les participants estiment de manière peu importante la douleur hors de leur bras bien qu'aucune différence significative n'apparaisse entre les conditions.

La vitesse de grossissement d'une représentation visuelle ne semble donc pas influencer l'évaluation de la localisation de la douleur, qu'elle soit dans ou hors du bras. En effet, les participants ont bien eu la sensation que la douleur était dans leur bras quelle que soit la grosseur de la représentation visuelle et son emplacement.

Sur son association à la douleur

Comme pour les conditions sans et avec grossissement, nous voulions déterminer si les participants associaient différemment la sphère à leur douleur lorsque sa vitesse de grossissement changeait. De nouveau, nous avons comparé les questions relatives à l'association de la sphère comme étant la douleur ou comme étant sans rapport avec la douleur. Les deux facteurs de grossissement en conditions intracorporelles et extracorporelles sur le bras et sur le mur ont été comparés (**Tableau VIII**).

Le test de Friedman a montré un effet significatif ($p < 0,0001$) entre les conditions lorsque les participants associaient la sphère à la douleur mais aucune différence locale entre les grossissements de facteur 1x et de facteur 2x n'a été observée lors des tests post-hoc de Dunn (G1 intra versus G2 intra et G1 extra versus G2 extra de la **Figure 39A**). Une ANOVA à mesures répétées a été effectuée pour compléter l'analyse et un effet significatif global ($F(1,34) = 5,020$; $p = 0,032$) du facteur « représentation visuelle : G1 versus G2 » a été montré. Les analyses post-hoc de Tukey confirment également l'absence de cet effet à l'échelle locale (G1 intra versus G2 intra et G1 extra versus G2 extra de la **Figure 39A**).

Un test de Friedman a également montré un effet significatif ($p = 0,005$) lorsque les participants estimaient que la sphère n'avait pas de rapport avec la douleur bien qu'aucune significativité n'ait été montrée entre les conditions deux à deux avec le test de Dunn . Une ANOVA à mesures répétées a également montré cette différence en révélant un effet significatif global ($F(1,34) = 9,796$; $p = 0,004$) du facteur « représentation visuelle : G1 versus G2 ». Les analyses de Tukey ont confirmé un effet significatif local ($p = 0,048$) entre les grossissements de facteur 1x et 2x intracorporelles (G1 intra versus G2 intra de la **Figure 39B**) mais pas dans les conditions extracorporelles (G1 extra versus G2 extra de la **Figure 39B**).

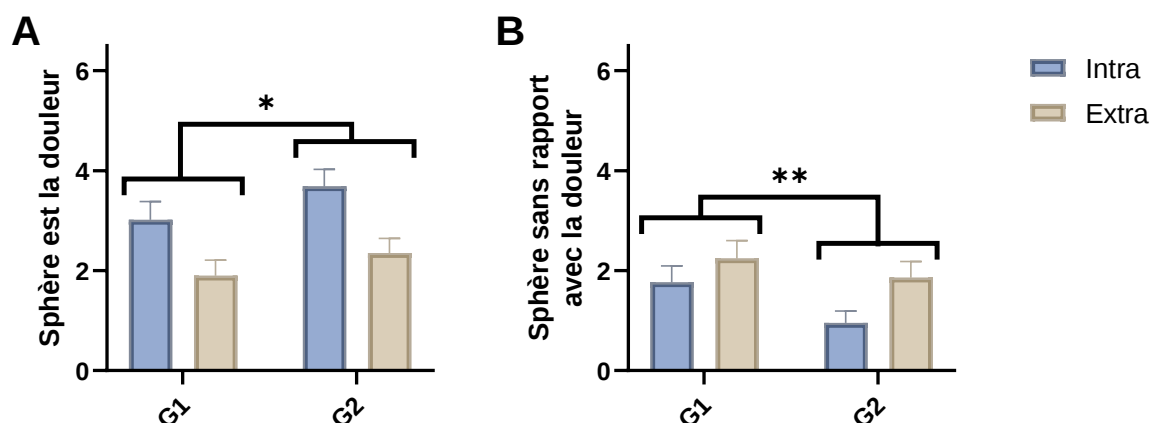


Figure 39 – Comparaison des associations de la représentation visuelle à la douleur entre les grossissements de facteurs 1x et 2x. La sphère est associée à la douleur de façon plus importante dans les conditions où elle apparaît sur le bras plutôt que sur le mur **(A)**. A l’inverse, la sphère est estimée comme sans rapport avec la douleur de façon plus importante lorsqu’elle apparaît sur le mur plutôt que sur le bras **(B)**. G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Nos résultats indiquent que les participants ont estimé que la sphère avait un rapport avec la douleur plus important lorsqu’elle grossissait d’un facteur 2x plutôt qu’un facteur 1x. A l’inverse, l’estimation selon laquelle la sphère était sans rapport avec la douleur était plus importante lorsque cette dernière grossissait d’un facteur 1x plutôt qu’un facteur 2x.

Sur son interprétation comme cause ou conséquence de la douleur

Comme précédemment, nous avons voulu savoir si la représentation visuelle était interprétée différemment comme étant une cause ou une conséquence de la douleur lorsque la vitesse de grossissement changeait. Les questions antagonistes estimant que la sphère était la douleur ou sans rapport avec la douleur ont été comparées entre les différents grossissements (**Tableau VIII**).

Les participants ont principalement eu la sensation que la sphère était causée par la douleur (**Figure 40A** versus **Figure 40B**). Bien que le test de Friedman ait révélé une différence significative globale ($p = 0,006$) dans l’évaluation des réponses à la seconde question les comparaisons post-hoc n’ont cependant pas permis de confirmer cette significativité entre les conditions prises deux à deux (**Figure 40B**).

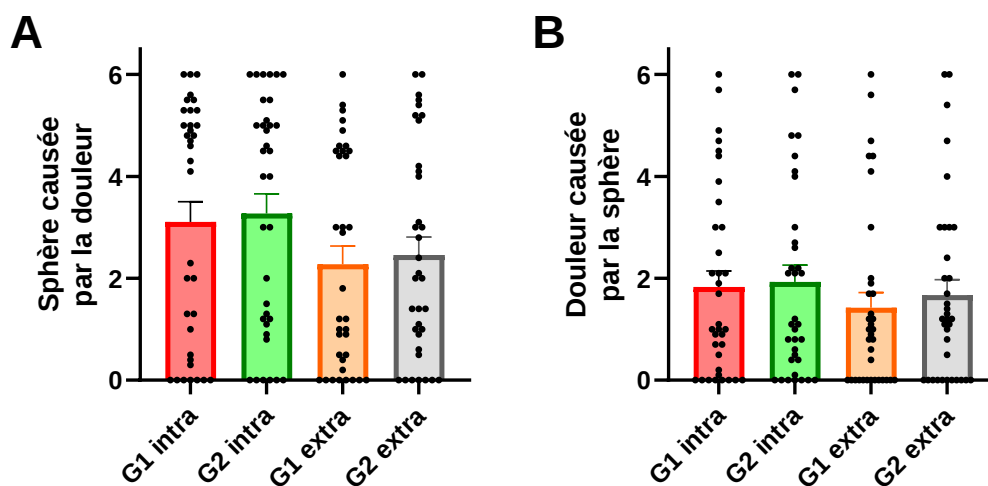


Figure 40 – Comparaison des niveaux d'association de la sphère comme étant la douleur ou sans rapport avec la douleur lorsque la représentation visuelle apparaît avec un grossissement de facteur 1x ou un facteur 2x sur le bras ou sur le mur. Les participants n'ont pas plus estimé que la sphère était causée par la douleur (A) ou que la douleur était causée par la sphère (B) quel que soit le grossissement. G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle.

La vitesse de grossissement ne semble pas moduler l'interprétation que les participants ont pour la représentation visuelle.

4.3.2.3. Influence de la localisation d'une représentation visuelle grossissante

Sur l'évaluation des seuils douloureux objectifs

La dernière étape de nos analyses consistait à étudier l'effet de la localisation de la représentation visuelle sur les seuils douloureux. En effet, il était intéressant de s'interroger sur l'impact que la représentation visuelle pouvait avoir sur la douleur lorsqu'elle apparaissait sur le bras ou sur le mur (**Figure 41**).

L'analyse des seuils douloureux n'a montré aucun effet de la localisation aussi bien pour les conditions sans et avec grossissements de facteurs 1x et 2x (SG versus G1 et SG versus G2) que pour la vitesse de grossissement (G1 versus G2).

Nos résultats indiquent que regarder la représentation visuelle sur le mur plutôt que sur le bras ne module donc pas les seuils douloureux des participants.

Sur les sensations douloureuses subjectives

Nous avons ainsi comparé les conditions intracorporelles versus extracorporelles de l'évaluation des réponses aux questions relatives à la localisation de la douleur. Pour rappel, la question « J'ai eu l'impression que la douleur était dans mon bras » était antagoniste à la question « J'ai eu l'impression que la douleur était hors de mon bras » (**Tableau VIII**).

Les résultats n'ont montré aucun effet de la localisation pour la première question. Toutefois, une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a montré une tendance de l'effet « localisation » pour les conditions sans grossissement versus avec grossissement de facteur 2x ($F(1,34) = 3,586$; $p = 0,067$; **Figure 42A**). Un effet significatif est apparu entre les conditions où la sphère grossissait d'un facteur 1x versus un facteur 2x ($F(1,34) = 4,134$; $p = 0,049$; **Figure 42B**). Cet effet était global (G1 intra + G2 intra versus G1 extra + G2 extra) mais pas local (G1 intra versus G1 extra et G2 intra versus G2 extra) étant donné que les analyses post-hoc n'ont pas montré de différence entre les conditions deux à deux.

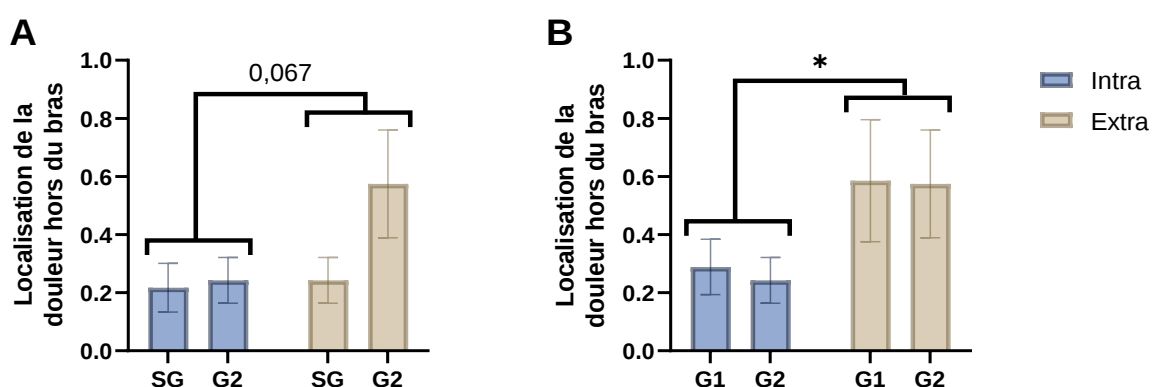


Figure 41 – Comparaison des localisations de la douleur hors du bras. La douleur hors du bras a tendance à être surévaluée en conditions extracorporelles pour les conditions sans et avec grossissement de facteur 2x (**A**). La douleur hors du bras est surévaluée en conditions extracorporelles pour les grossissements de facteurs 1x et 2x (**B**). SG : sans grossissement ; G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

La présence de la représentation visuelle sur le mur entraîne une surévaluation subjective de la douleur hors du bras.

Sur son association à la douleur

Comme précédemment, nous voulions déterminer si une représentation visuelle apparaissant sur le bras ou sur le mur pouvait être associée à la douleur de manière différente. Nous avons comparé l'évaluation des réponses relatives à l'association de la représentation visuelle à la douleur en conditions intracorporelles et extracorporelles (**Tableau VIII**).

Les tests de Friedman ont montré des différences significatives ($p < 0,0001$) dans toutes les conditions (**Figures 43A à 43C**) et les analyses post-hoc de Dunn ont confirmé plusieurs différences significatives entre les conditions intracorporelles et extracorporelles pour la question relative à l'association de la sphère comme étant la douleur. En effet, la représentation visuelle grossissante de facteur 1x apparaissant sur le bras a significativement été surestimée comme étant la douleur par rapport à une même représentation visuelle apparaissant sur le mur (G1 intra versus G1 extra : $p = 0,003$; **Figure 43A**).

Les mêmes analyses ont été effectuées pour le facteur grossissant 2x. Les tests post-hoc ont montré une différence significative entre les mêmes conditions (G2 intra versus G2 extra : $p = 0,005$; **Figure 43B**).

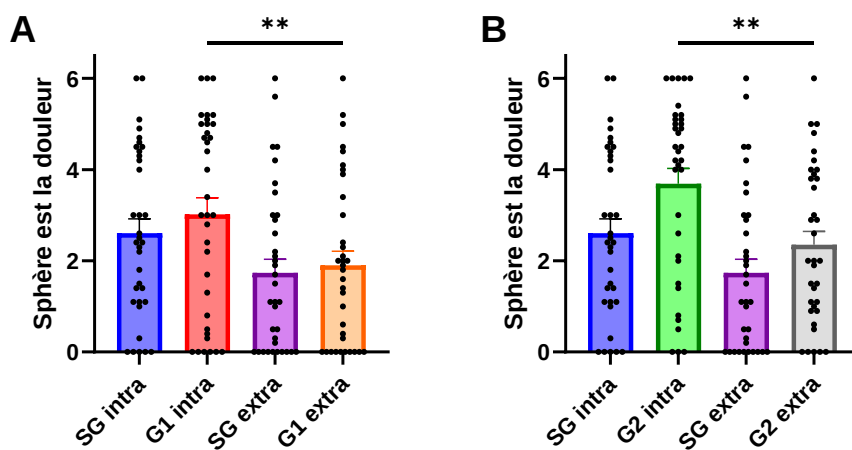


Figure 42 – Association de la représentation visuelle comme douleur ou comme ayant un rapport avec la douleur en fonction de la localisation. L'évaluation de la sphère comme étant la douleur est plus importante lorsque la sphère grossit sur le bras plutôt que sur le mur d'un facteur 1x (**A**) et d'un facteur 2x (**B**). SG : sans grossissement ; G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a complété l'analyse. Des effets significatifs ($p < 0,0001$) du facteur « localisation : bras versus mur » ont été montrés dans toutes les conditions pour la première question (**Figures 44A, 44C, 44E**) et dans deux conditions pour la seconde question (respectivement $F(1,34) = 7,659$; $p = 0,009$; **Figures 44D** et $F(1,34) = 5,696$; $p = 0,023$; **Figure 44F**). Une tendance est apparue également pour les conditions sans et avec grossissement de facteur 1x ($F(1,34) = 3,170$; $p = 0,084$; **Figure 44B**). Les évaluations selon lesquelles la sphère était considérée comme étant la douleur étaient donc plus élevées dans les conditions intracorporelles qu'extracorporelles. À l'inverse, les évaluations selon lesquelles la sphère était sans rapport avec la douleur ont été plus élevées en conditions extracorporelles qu'intracorporelles. Les analyses post-hoc n'ont toutefois pas montré de différences entre les conditions deux à deux.

Nos analyses indiquent que la représentation visuelle est plus associée à la douleur lorsqu'elle apparaît sur le bras plutôt que sur le mur. Ces conclusions sont cohérentes avec nos résultats qui indiquent que la représentation visuelle est estimée de manière plus importante comme étant sans rapport avec la douleur lorsqu'elle apparaît sur le mur plutôt que sur le bras.

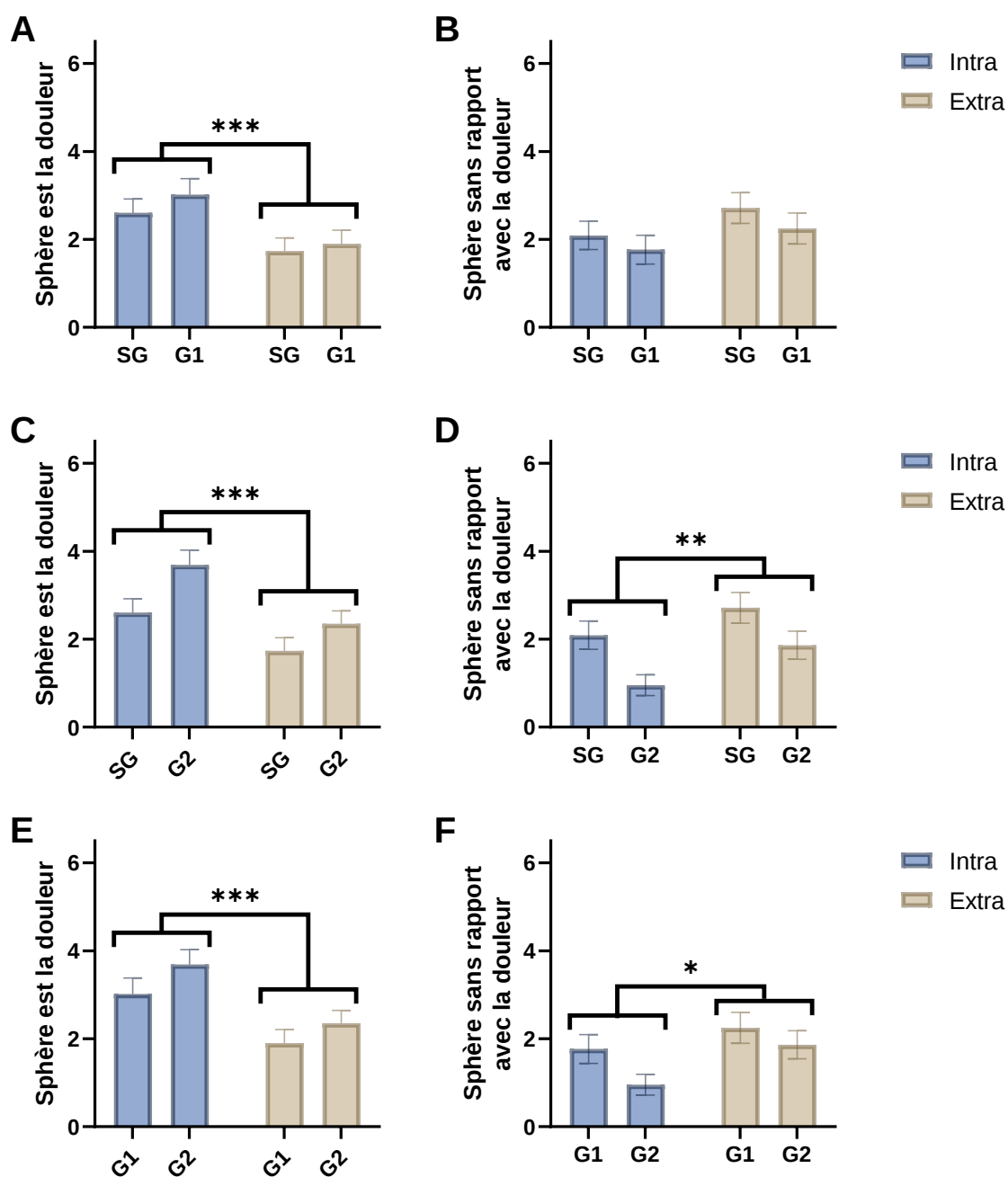


Figure 43 – Comparaison des évaluations de la douleur comme étant la douleur ou sans rapport avec la douleur en fonction de sa localisation. La sphère est considérée comme étant la douleur de manière plus importante lorsqu'elle apparaît sur le bras plutôt que sur le mur (**A**). La sphère est considérée comme n'ayant pas de rapport avec la douleur de manière plus importante lorsqu'elle apparaît sur le mur plutôt que sur le bras (**B**). SG : sans grossissement ; G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Sur son interprétation comme cause ou conséquence de la douleur

Enfin, nous avons voulu déterminer si la représentation visuelle était interprétée différemment comme étant une cause ou une conséquence de la douleur lorsqu'elle apparaissait sur le bras ou sur le mur. Les questions « J'avais l'impression que la douleur était causée par la sphère rouge » et « J'avais l'impression que la sphère rouge était causée par la douleur » ont été comparées dans les conditions intracorporelles et extracorporelles (**Tableau VIII**).

Les ANOVA à mesures répétées à deux facteurs ont montré des différences significatives seulement pour la première question. En effet, la présence d'une représentation visuelle sur le bras a entraîné une surévaluation de son interprétation comme étant une conséquence de la douleur. Ces observations ont été précisées entre les conditions sans et avec grossissement de facteur 1x ($F(1,34) = 4,932$; $p = 0,033$; **Figure 45A**), entre les conditions sans et avec grossissement de facteur 2x ($F(1,34) = 5,833$; $p = 0,021$; **Figure 45B**) et entre les vitesses de grossissement ($F(1,34) = 6,109$; $p = 0,002$; **Figure 45C**). Les analyses post-hoc n'ont toutefois pas montré de différences entre les conditions deux à deux.

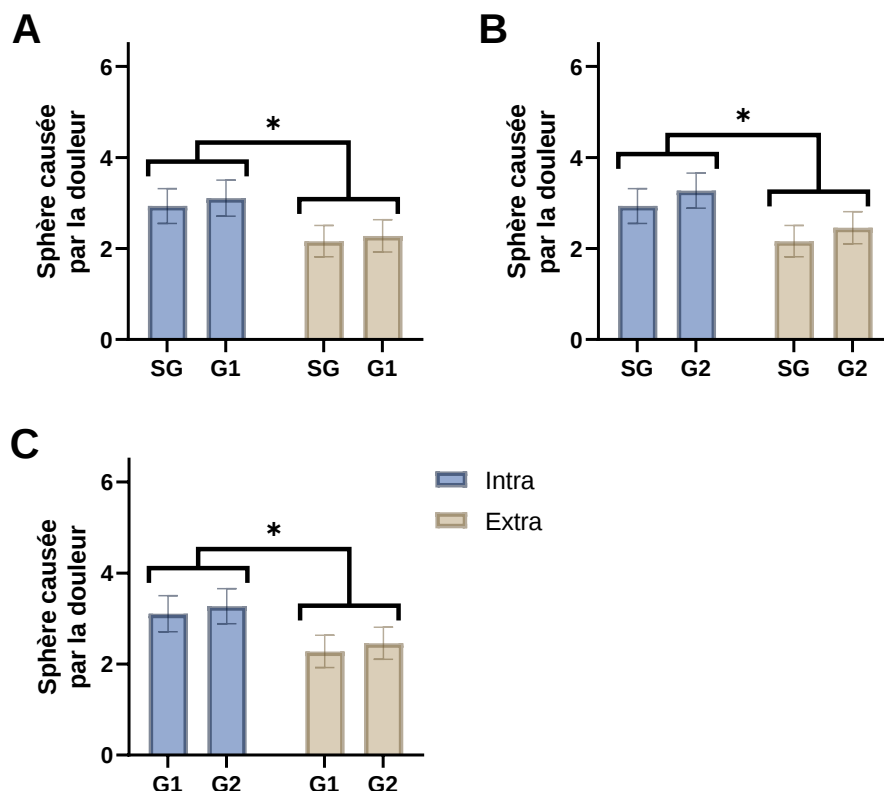


Figure 44 – Comparaison des interprétations de la représentation visuelle comme étant causée par la douleur en fonction de sa localisation. (A) Dans les conditions sans ou avec grossissement de facteur 1x. **(B)** Dans les conditions sans ou avec grossissement de facteur 2x. **(C)** Dans les conditions avec grossissements de facteurs 1x et 2x. SG : sans grossissement ; G1 : grossissement de facteur 1x ; G2 : avec grossissement de facteur 2x ; intra : intracorporelle ; extra : extracorporelle. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

L'interprétation de la sphère comme étant causée par la douleur est surévaluée dans les conditions où la représentation visuelle apparaît sur le bras par rapport aux conditions où elle apparaît sur le mur.

4.4. Discussion

4.4.1. Influence du grossissement d'une représentation visuelle sur l'incarnation

De manière générale, les niveaux d'incarnation étaient élevés pour l'ensemble des participants. Ces résultats étaient attendus étant donné que les paramètres mis en place dans ce protocole étaient identiques à la première étude. En effet, les participants avaient de nouveau la possibilité de voir leur corps virtuel, généré et réaliste, en totalité, du point de vue de la première personne et avec la possibilité de contrôler leurs bras virtuels. Pour rappel, ces quatre composantes influent fortement sur l'incarnation des participants [114], [122], [123], [128], [138], [206].

Pour rappel, Fusaro et al. ont montré que la présence d'un stimulus douloureux (comme une aiguille) induisait un sentiment de possession supérieur par rapport à un stimulus neutre ou agréable. L'étude était en réalité virtuelle et d'un point de vue à la première personne [196]. De plus, à la suite de l'étude 1, nous avons émis l'hypothèse que les niveaux de possession corporelle et d'incarnation seraient plus élevés si la représentation visuelle sur le bras grossissait en association avec l'augmentation de la stimulation électrique. Les participants auraient pu alors associer plus efficacement la douleur à la représentation visuelle. Toutefois, nous n'avons pas pu mettre en évidence un effet de ce grossissement sur aucune des composantes de l'incarnation. Cette absence d'effet du grossissement pourrait, de nouveau s'expliquer par une association limitée de la représentation visuelle à la douleur. Les participants ont en effet présenté des scores assez faibles aux questions relatives à l'évaluation de la représentation visuelle comme étant leur douleur (niveaux inférieurs à 3 sur 6). Cela peut s'expliquer par le fait que la couleur et/ou la forme imposée dans notre expérimentation ne correspondait pas forcément à l'image mentale de la douleur que les participants pouvaient se représenter.

De manière similaire à l'étude 1, nous avons envisagé que la présence de la sphère intracorporelle n'aurait aucun impact sur l'agentivité. Cependant, nos résultats ont montré que les niveaux d'agentivité étaient moins élevés lorsque la sphère apparaissait sur le bras plutôt que sur le mur. Afin de tenter de donner une explication à ce résultat, nous pouvons émettre l'hypothèse que l'apparition de la sphère sur le bras virtuel des participants a été

interprétée par ces derniers comme étant indépendante de leur volonté et que par extension, le contrôle de leur bras soit lui aussi indépendant. Ainsi, une légère diminution du contrôle du bras entraînerait une diminution de l'agentivité.

Aucune différence de localisation de la représentation visuelle n'a été montrée concernant la localisation de soi. Nous nous attendions pourtant, comme pour les résultats obtenus lors de l'étude 1, à ce que la présence de la représentation visuelle sur le bras augmente la localisation de soi étant donné que les retours visuels d'un corps virtuel jouent un rôle majeur dans les phénomènes d'incarnation [114]. L'hypothèse la plus plausible serait que la présence de la sphère sur le mur n'a pas perturbé les participants et qu'ils aient estimé que l'emplacement de leur corps réel par rapport au corps virtuel n'a pas bougé au cours de l'expérimentation.

4.4.2. Influence d'une représentation visuelle sur la modulation objective de la douleur

Les résultats ont montré que la présence de la sphère sur le bras ou sur le mur ainsi que l'absence de grossissement par rapport à un grossissement ne modulait pas les seuils douloureux. Toutefois, un effet de vitesse de grossissement est apparu. En effet, les sphères grossissantes d'un facteur 2x ont entraîné une diminution des seuils douloureux (et donc un effet « algésique ») par rapport à un grossissement de facteur 1x. Nous nous attendions, d'une part, à obtenir un effet de la vitesse sur les seuils douloureux mais nous pensions également que les seuils douloureux diminueraient également en présence d'une sphère grossissante (de facteur 1x ou 2x) par rapport à une absence de grossissement. Une explication possible pourrait venir du fait que les participants n'ont pas associé la représentation visuelle à leur douleur lorsque celle-ci ne grossissait pas (confirmant les résultats de l'étude 1). A l'inverse, dans le cas où la sphère grossissait, les participants l'associaient plus fortement à leur douleur, ce qui aurait pu agir sur les seuils douloureux. Il est toutefois important de préciser que cette association de la représentation visuelle à la douleur était malgré tout limitée pour les participants (inférieure à 3 sur 6). Nos résultats indiquent également qu'une sphère grossissante de facteur 2x était plus associée à la douleur qu'en absence de grossissement et ce, de manière plus importante lorsqu'elle apparaît sur le bras plutôt que sur le mur.

4.4.3. Influence d'une représentation visuelle sur la modulation subjective de la douleur

Le grossissement d'une sphère sur le bras a entraîné une sous-évaluation de la douleur dans le bras lorsque celle-ci grossissait d'un facteur 1x par rapport à une absence de grossissement. Cependant, et de manière étonnante, cette différence n'a pas été confirmée pour le grossissement de facteur 2x. Concernant la question antagoniste, le grossissement de la sphère a entraîné une surévaluation de la douleur hors du bras (pour les deux facteurs) par rapport à une absence de grossissement. Contrairement aux résultats obtenus, nous nous attendions à n'obtenir aucune différence de localisation de la douleur dans le bras quelles que soient les conditions expérimentales intracorporelles.

Enfin, la représentation visuelle sur le mur a engendré une surévaluation de la douleur hors du bras ce qui est en accord avec l'hypothèse que nous avons émise. En effet, il était probable que la présence d'une représentation visuelle synchrone (grossissante ou non) sur le mur perturbe les participants et entraîne un conflit d'évaluation de la localisation de la douleur hors du bras. Il est toutefois important de noter que les niveaux obtenus étaient très faibles par rapport à l'évaluation de la douleur dans le bras.

CHAPITRE 3

Influence de la représentation visuelle
sur la perception somatosensorielle et
la douleur d'un point de vue à la
première et à la troisième personne

5. Chapitre 3

5.1. Introduction

De nombreuses études ont montré qu'il était possible de simuler une sensation de sortie de corps à l'aide de la réalité virtuelle [119], [120] ou de l'hypnose [207]. Certaines d'entre elles se sont plus particulièrement intéressées à la modulation des sensations douloureuses et ont montré une diminution significative de la douleur lorsque le point de vue des participants étaient à la troisième personne (autrement dit, lorsque les participants se voient d'un point de vue externe) [185], [187]. Toutefois, aucune d'entre elles ne s'est intéressée à l'impact de la présence d'une représentation visuelle sur la douleur en sortie de corps.

L'objectif principal de cette étude était donc d'étudier la modulation de la douleur lorsque les participants avaient l'impression d'être sortis de leur corps et lorsqu'une représentation visuelle apparaissait de manière synchrone à la douleur sur le bras de leur avatar. Les objectifs secondaires étaient de poursuivre les recherches de l'étude 2 en évaluant l'impact du grossissement d'une représentation visuelle sur les intensités tactiles ressenties.

Nous avons donc d'une part, comparé de manière objective les conditions où les sujets étaient à la première personne (avant la sortie de corps simulée) aux conditions où les sujets s'observaient à la troisième personne (après la sortie de corps simulée) et d'autre part, comparé les conditions lorsque la représentation visuelle était présente ou absente. Nous avons également étudié l'influence de la présence et du grossissement d'une représentation visuelle sur l'intensité électrique par l'évaluation subjective des participants.

La première partie de ce chapitre présentera la stratégie expérimentale mise en place sélectivement dans cette dernière étude. La seconde partie se focalisera sur les résultats obtenus et sera elle-même divisée en quatre sous-parties. La première présentera les effets de la sortie de corps et de la représentation visuelle sur l'incarnation. La seconde présentera leurs effets sur les seuils douloureux. La troisième s'intéressa, quant à elle, à leurs effets sur l'intensité subjective ressentie et la quatrième permettra d'évaluer si une corrélation existe entre les niveaux d'incarnation, de sortie de corps et de suggestibilité des participants. Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la discussion et à la conclusion de cette étude.

5.2. Stratégie expérimentale de l'étude 3

Les informations présentées dans ce paragraphe concernent exclusivement l'étude 3 et n'ont pas été mentionnées dans la partie « matériels et méthodes » du manuscrit.

Cette étude a reçu un avis favorable du comité de protection des personnes (CPP) Est I (ID 2021-A00228-33).

5.2.1. Participants

40 volontaires (20 hommes et 20 femmes) ont participé à cette étude. La moyenne d'âge était de 26,54 (SD = 4,81 ; min = 19 ; max = 35). Tous les participants se sont portés volontaires et ont donné leur consentement préalable.

5.2.2. Protocole expérimental

Le protocole expérimental a été élaboré pour évaluer objectivement les seuils douloureux en fonction de la présence ou non d'une représentation visuelle et du point de vue à la 1^{ère} ou 3^{ème} personne. Il a également été élaboré afin d'évaluer subjectivement les intensités de stimulations électriques ressenties par les participants. Pour cela, le protocole a été divisé en huit phases distinctes illustrées dans la **Figure 46**.

Durant la première phase (phase 1 de la **Figure 46**), une stimulation visuomotrice a été proposée aux participants pour leur permettre de s'incarner efficacement dans leur avatar. Cette stimulation se présentait sous la forme d'une vidéo dont les participants devaient reproduire les gestes.

Pour la seconde phase (phase 2 de la **Figure 46** et condition sans sphère SS 1PP de la **Figure 47A**), le point de vue des participants était à la première personne (1PP) et aucune représentation visuelle n'apparaissait (SS) lorsque la stimulation électrique était délivrée sur le bras dominant du participant. Comme pour les études précédentes, les trois seuils douloureux ont été obtenus à l'aide de la méthode de l'escalier (cf. partie « matériels et méthodes » pour plus d'informations) et un questionnaire d'incarnation (identique aux deux premières études) a été proposé aussitôt après. L'étape suivante consistait à évaluer subjectivement les intensités électriques ressenties par les participants en absence d'une représentation visuelle. Le détail de l'évaluation des intensités électriques sera présenté dans la partie suivante « évaluation des intensités électriques ».

Le début de la troisième phase (phase 3 de la **Figure 46** et condition ASS 1PP de la **Figure 47B**) était identique à celui de la seconde phase à la différence près qu'une représentation visuelle grossissante apparaissait de manière synchrone à la stimulation électrique sur le bras du participant. De même, les intensités électriques ont également été évaluées en présence d'une représentation visuelle. Dans un premier temps, cette représentation visuelle grossissait avec un facteur proportionnel à l'intensité électrique (condition cohérente) alors que dans un second temps, cette représentation visuelle grossissait avec un facteur plus ou moins important pour une même intensité électrique donnée (condition incohérente). Après chacune de ces évaluations subjectives, un questionnaire d'influence était proposé aux participants.

L'ordre de passage de la seconde (SS 1PP) et de la troisième phase (ASS 1PP) a été randomisé.

La quatrième phase (phase 4 de la **Figure 46**) consistait à simuler une sortie de corps en réalité virtuelle. Elle sera présentée dans la partie « sortie de corps » ci-après.

La cinquième (phase 5 de la **Figure 46** et condition SS 3PP de la **Figure 47C**) et la sixième phase (phase 6 de la **Figure 46** et condition ASS 3PP de la **Figure 47D**) ont également été randomisées. Elles étaient identiques aux phases 2 (SS 1PP) et 3 (ASS 1PP) à la différence près que le point de vue était à la troisième personne. Dans ces conditions, les participants voyaient donc leur corps virtuel localisé devant eux et devaient fixer le bras virtuel de leur avatar.

La septième phase (phase 7 de la **Figure 46**) permettait d'effectuer un retour dans le corps virtuel et de retrouver ainsi un point de vue à la première personne.

La huitième phase (phase 8 de la **Figure 46**) consistait à évaluer le niveau de suggestibilité individuel des participants. Pour cela, ils devaient regarder une vidéo, suivre les indications de la vidéo et répondre à un questionnaire de suggestibilité à la fin.

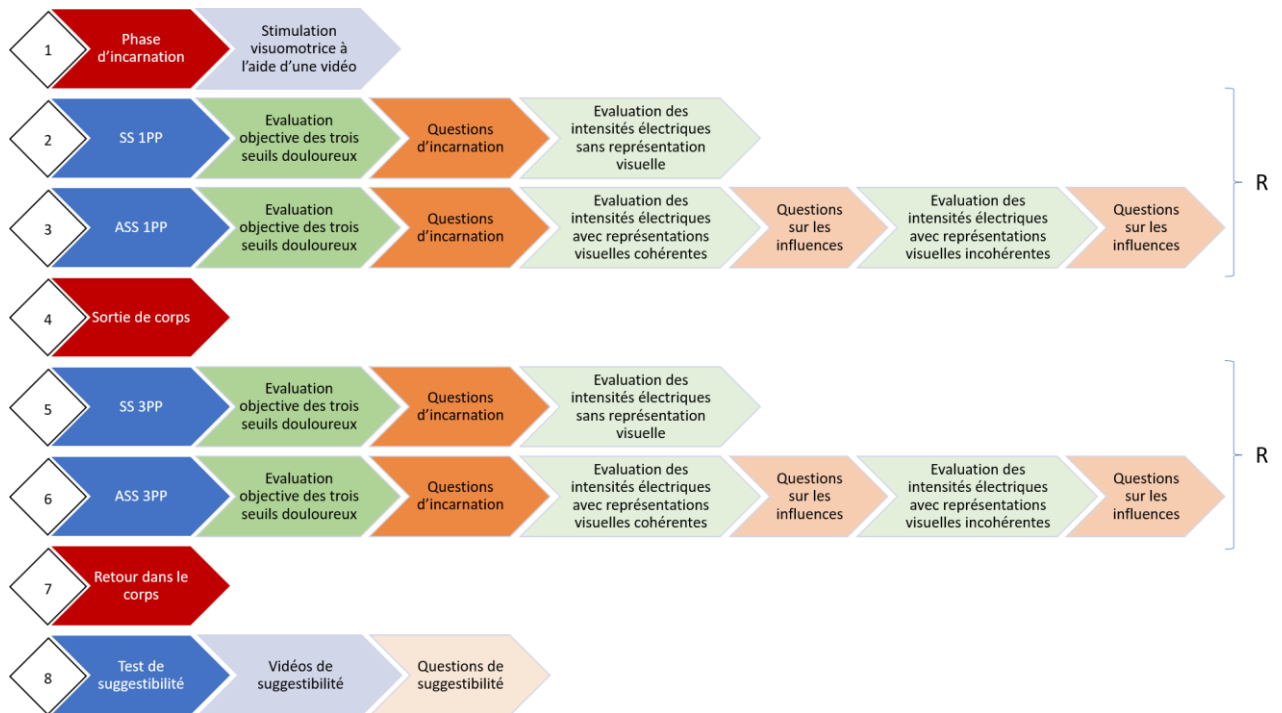


Figure 45 - Schéma résumant les huit phases du protocole expérimental. Les cases en bleu et en rouge correspondent au titre des phases expérimentales. Les évaluations objectives des seuils douloureux sont indiquées en vert foncé et les évaluations subjectives des intensités électriques sont indiquées en vert clair. Les questionnaires d'incarnation sont indiqués en orange foncé, les questionnaires sur l'influence de la stimulation électrique et de la représentation visuelle sont indiqués en orange clair et le questionnaire de suggestibilité est indiqué en orange très clair. Le passage des vidéos est indiqué en gris. SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne ; R : passage des phases randomisées.

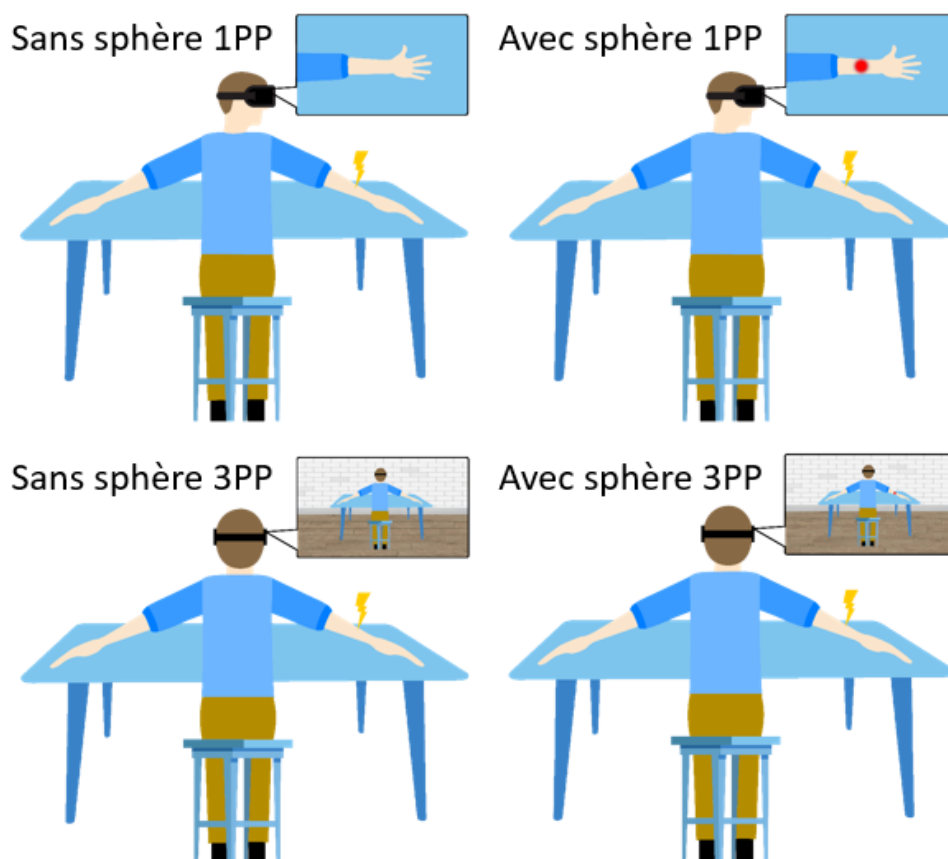


Figure 46 – Schéma du protocole expérimental. (A) Condition sans représentation visuelle du point de vue à la première personne (SS 1PP). Les participants regardent leur bras dominant à la première personne et une stimulation électrique est délivrée sur le bras. **(B) Condition avec représentation visuelle du point de vue à la première personne (ASS 1PP).** Les participants regardent leur bras à la première personne et une représentation visuelle apparaît de manière synchrone à la stimulation électrique délivrée sur le bras. Le grossissement augmente de manière cohérente à la stimulation électrique. **(C) Condition sans représentation visuelle du point de vue à la troisième personne (SS 3PP).** Les participants regardent le bras virtuel de leur avatar à la troisième personne et une stimulation électrique est délivrée sur le bras. **(D) Condition avec représentation visuelle du point de vue à la troisième personne.** Les participants regardent le bras virtuel de leur avatar à la troisième personne et une représentation visuelle apparaît de manière synchrone à la stimulation électrique délivrée sur le bras. Le grossissement augmente de manière cohérente à la stimulation électrique. NB : Dans l'expérimentation, les bras étaient positionnés plus en avant et posés sur une table réelle qui coïncidait parfaitement à l'emplacement de la table virtuelle.

5.2.3. Évaluation des seuils douloureux

Les seuils douloureux ont été évalués avec la méthode de l'escalier de la même manière que dans les études 1 et 2 (cf. partie « **2.10. Détermination du seuil douloureux** » pour plus d'informations).

5.2.4. Évaluation des intensités électriques

Objectifs

L'évaluation subjective des intensités électriques (cases vert clair de la **Figure 46**) par les participants permettait de comparer l'impact de la présence ou de l'absence d'une représentation visuelle.

Vue générale

L'évaluation des intensités électriques reposait donc sur le principe que les participants recevaient des stimulations électriques dans le bras et qu'ils devaient les évaluer aussitôt après, sur une échelle d'intensité de 0 à 10.

Les intensités électriques variaient d'un participant à l'autre étant donné qu'elles dépendaient du seuil douloureux moyen (obtenu à partir de la moyenne des trois seuils douloureux) de la même condition. A titre d'exemple, un participant ayant obtenu des seuils douloureux de 9 mA, 10 mA et 11 mA dans la condition « avec sphère à la première personne » (ASS 1PP) obtenait une moyenne de 10 mA. Cette moyenne servait ensuite de référence pour délivrer les différentes intensités électriques sur le bras de ce participant (10% de l'intensité électrique de 10 mA permettait ainsi de délivrer une stimulation de 1 mA ; 2,5 mA pour 25% ; etc.). Toutes les stimulations électriques étaient donc délivrées à des intensités inférieures au seuil douloureux.

La taille de la sphère qui apparaissait lors du troisième seuil douloureux d'une condition donnée (ASS 1PP ou ASS 3PP), servait de taille de référence pour la même condition. Ainsi, les pourcentages de grossissement de la sphère qui apparaissait sur le bras du participant dépendaient d'une part, de cette taille de référence et d'autre part, de la condition (ASS 1PP ou ASS 3PP).

Échelle subjective de l'intensité électrique

Afin de guider les participants, l'expérimentateur indiquait que l'intensité 0 correspondait à une absence de sensation et l'intensité 10 correspondait au seuil douloureux du participant (obtenu juste avant dans la même condition). Pour aider les sujets à calibrer leur propre échelle, et à chaque début de condition expérimentale, une intensité minimale de 10% de son seuil douloureux était délivrée, suivie d'une stimulation maximale de 95% du même seuil douloureux. Pour reprendre l'exemple du participant ayant eu une moyenne de 10 mA en condition ASS 1PP, les intensités électriques délivrées au début de la condition étaient respectivement de 1 mA (représentant 10 % de son seuil douloureux) et de 9,5 mA (représentant 95% de son seuil douloureux). L'expérimentateur informait ensuite le participant que les autres stimulations électriques seraient délivrées avec des intensités aléatoires entre ces deux stimulations extrêmes (10% et 95%).

Pour chaque stimulation électrique reçue, le participant devait ainsi évaluer son intensité (de 0 à 10) et la prononcer à haute voix.

Détail des conditions

Trois types de conditions ont été étudiées : conditions sans représentation visuelle, conditions avec représentations visuelles cohérentes et conditions avec représentations visuelles incohérentes.

L'impact de la présence d'une représentation visuelle était étudié en comparant les conditions sans et avec représentations visuelles cohérentes. L'impact du grossissement était étudié via les conditions avec représentations visuelles incohérentes.

Dans les conditions « sans représentation visuelle » (SS 1PP et SS 3PP), et comme indiqué sur la **Figure 48A**, 7 stimulations étaient délivrées aléatoirement pour chacun des 4 pourcentages (25%, 50%, 60% et 85%) pour un total de 28 stimulations électriques. Pour rappel, aucune représentation visuelle n'apparaissait sur le bras virtuel dans cette condition.

Dans les conditions « avec représentations visuelles cohérentes » (ASS 1PP et ASS 3PP), 7 stimulations étaient délivrées aléatoirement pour chacun des 4 pourcentages et les représentations visuelles cohérentes apparaissaient de manière synchrone. La taille de cette représentation visuelle correspondait au pourcentage de la taille de la sphère de référence de

la même condition (**Figure 48B**). Par exemple, si la taille de la sphère était de 3 cm lors du troisième seuil douloureux, alors la représentation visuelle apparaissait avec une taille de 0,75 cm pour 25%, de 1,5 cm pour 50%, etc. Dans cette condition, les grossissements de la sphère étaient cohérents aux intensités électriques délivrées (par exemple une stimulation électrique à 25% du seuil douloureux faisait apparaître une sphère avec une taille de 25%).

Enfin, dans les conditions « avec représentations visuelles incohérentes » (ASS 1PP et ASS 3PP), 7 stimulations aléatoires étaient délivrées de manière cohérente entre le pourcentage de l'intensité électrique et le pourcentage du grossissement de la représentation visuelle (comme pour la condition précédente). Toutefois, lorsque ces 16 premières stimulations aléatoires étaient délivrées (4 à 25% + 4 à 50% + 4 à 60% + 4 à 85% ; en vert sur la **Figure 48C**), 30 autres stimulations complétaient l'expérimentation. Ces 30 stimulations électriques délivrées aléatoirement étaient cohérentes ou incohérentes vis-à-vis de la taille de la sphère (en bleu sur la **Figure 48C**). Par exemple, une stimulation incohérente correspond à un pourcentage d'intensité électrique de 50% et à un pourcentage de grossissement de la représentation visuelle de 25%. Ainsi, les représentations visuelles pouvaient être inférieures, identiques ou supérieures au pourcentage d'intensité délivré.

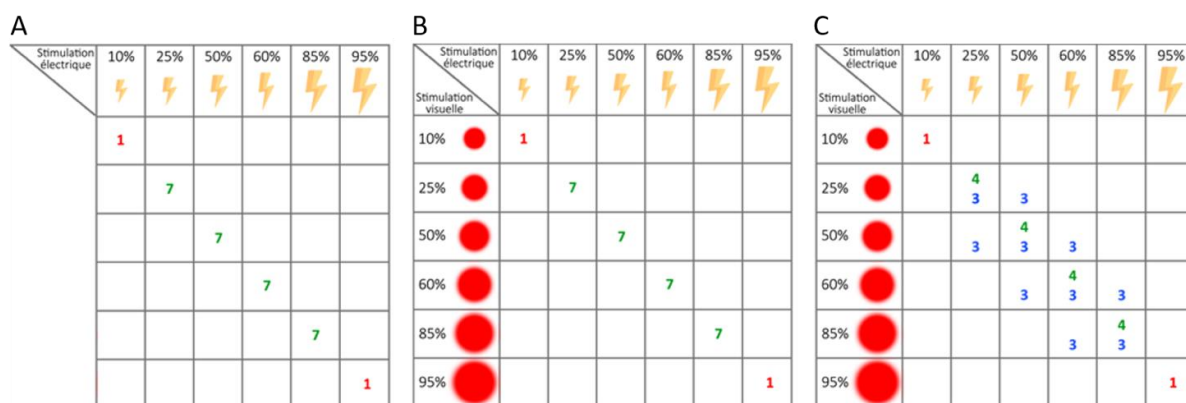


Figure 47 – Schéma du nombre de stimulations électriques délivrées en fonction des pourcentages d'intensité électrique et des pourcentages de grossissement de la représentation visuelle. (A) Condition sans représentation visuelle (SS 1PP et SS 3PP). Seules les stimulations électriques sont délivrées. **(B) Conditions avec représentations visuelles cohérentes (ASS 1PP et ASS 3PP).** Les stimulations électriques sont délivrées en fonction d'un pourcentage identique entre le grossissement de la représentation visuelle et le pourcentage de l'intensité électrique. **(C) Conditions avec représentations visuelles cohérentes et incohérentes (ASS 1PP et ASS 3PP).** Les stimulations électriques sont délivrées en fonction d'un pourcentage identique entre le grossissement de la représentation visuelle et le pourcentage de l'intensité électrique dans un premier temps (le nombre de stimulations est indiqué en vert) suivie de stimulations cohérentes ou incohérentes (le nombre est indiqué en bleu). Le nombre de stimulations pour la phase de calibrage est indiqué en rouge.

5.2.5. Modifications de l'environnement virtuel

Dans cette étude, l'environnement virtuel a été enrichi pour optimiser la simulation de sortie de corps. Ainsi, deux objets ont été ajoutés dans le champ de vision des participants et un son a été diffusé durant la simulation de sortie de corps. Enfin, la capacité des participants à contrôler leurs bras virtuels a été supprimée lorsque le point de vue était à la troisième personne.

Enrichissement de l'environnement virtuel

Le terme devection est utilisé pour désigner les illusions visuelles d'automouvements induites par des observateurs stationnaires (en déplaçant ou en simulant le mouvement de l'environnement) [208]. Lavection peut être visuelle ou auditive, circulaire ou linéaire.

Dans notre expérimentation, l'objectif était d'optimiser la simulation de sortie de corps en créant un effet de mouvement via des vections (visuelle et auditive) linéaires. Pour se faire, un ventilateur sur pied et un poste radio, modélisés en 3D, ont respectivement été ajoutés à gauche et à droite du participant alors qu'un son relaxant provenant du poste radio a été diffusé durant la sortie de corps. Le volume du son diminuait au fur et à mesure que le participant sortait de son corps. Ces changements sensoriels (visuel et auditif) ont été ratifiés pendant la séquence de sortie de corps à l'aide d'un discours de suggestions hypnotiques prononcé par l'expérimentateur (voir Partie 3.3).

Simulation de la sortie de corps

L'illusion de sortie de corps a été créée à l'aide d'un mouvement de caméra dans l'environnement virtuel. Ainsi, la caméra localisée au niveau des yeux des participants (pour permettre la vue à la première personne ; **Figure 49A**) a lentement été déplacée vers l'arrière et le haut de la pièce (salle d'expérimentation modélisée en 3D) de manière linéaire jusqu'à obtenir un point de vue à la troisième personne (**Figure 49B**). La position élevée a été choisie afin de permettre aux participants de voir le bras de leur avatar qui recevrait les stimulations durant les conditions expérimentales.

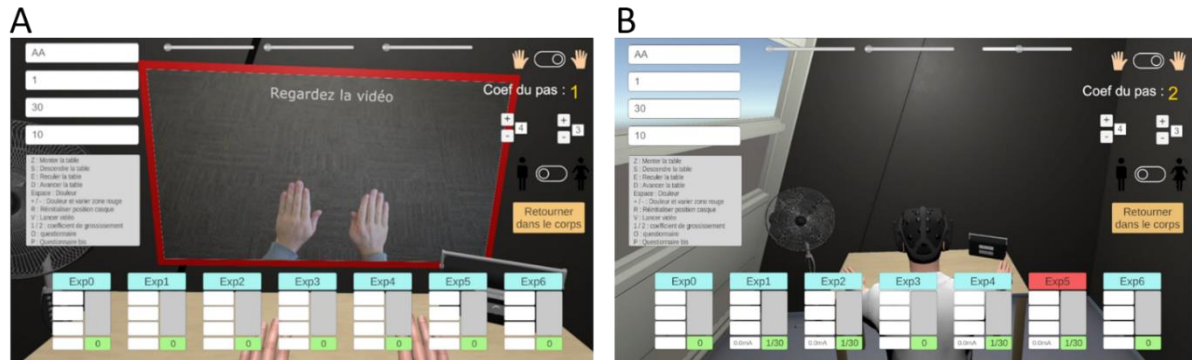


Figure 48 - Illustrations de l'environnement virtuel d'un point de vue à la première et à troisième personne (l'interface était visible seulement par l'expérimentateur). (A) Point de vue à la première personne. Les participants voyaient, à proximité, le ventilateur et le poste radio. Dans cette illustration, le participant reproduisait les gestes indiqués dans une vidéo afin de créer une stimulation visuomotrice et ainsi optimiser l'illusion d'incarnation. **(B) Point de vue à la troisième personne.** Le participant voyait l'environnement virtuel d'une position reculée et élevée. Les indices visuels (ventilateur, table et poste de radio) sont ainsi plus éloignés.

Plusieurs tests ont été effectués afin d'optimiser la vitesse du mouvement de recul de la caméra et ainsi éviter le « mal de la réalité virtuelle » (appelé aussi cybercinétose) tout en renforçant l'effet devection auditive.

Renforcement de la sortie de corps par un discours de suggestions

Un discours de suggestions hypnotiques a été prononcé par l'expérimentateur à trois moments clés de l'expérimentation. Sa retranscription est disponible dans la partie « **Annexe 1** » de ce manuscrit.

La première partie du discours a été prononcée au début de l'expérimentation, avant et après la stimulation visuomotrice, afin de renforcer l'illusion d'incarnation. La seconde partie du discours avait pour but d'accompagner l'attention des sujets pendant le processus dynamique de la sortie de corps, afin de ratifier les changements sensoriels (visuel et auditifs) et ainsi favoriser le point de vue à la 3^{ème} personne. La dernière partie du discours, au terme du passage des conditions à la troisième personne, avait pour objectif d'accompagner les sujets pour se réassocier dans de bonnes conditions à leur avatar à la première personne.

Manipulation de l'agentivité au cours des expériences

L'objectif primordial tout au long de l'expérimentation était de créer une forte illusion d'incarnation dans les conditions à la première personne (1PP) afin que les participants aient l'impression que leur avatar soit leur propre corps. Cette bonne incarnation était également

essentielle afin qu'ils puissent vivre l'expérience de sortie de corps à la troisième personne (3PP) dans la seconde phase.

Par conséquent, nous avons tenté d'influencer l'agentivité des sujets dans ces différentes positions perceptuelles. Dans la vue à la première personne, les participants reproduisaient les gestes indiqués dans une vidéo afin de créer une stimulation visuomotrice et ainsi optimiser l'illusion d'incarnation (Figure 4A). En revanche, afin de favoriser la sensation de dissociation chez les participants, lors des expériences de sorties de corps (en vue à la troisième personne), le contrôle moteur de l'avatar a totalement été désactivé (fixé dans une position statique). Par conséquent, les sujets avaient toujours la possibilité de bouger la tête pour regarder autour d'eux mais ne pouvaient plus visualiser leurs mouvements sur l'avatar devant eux.

5.2.6. Questionnaires

Dans le cadre de cette expérimentation, plusieurs questionnaires ont été proposés aux participants : un questionnaire d'incarnation ; un questionnaire relatif à la représentation visuelle ; un questionnaire de sortie de corps ; un questionnaire d'influence de la stimulation ; et un questionnaire de suggestibilité à l'hypnose (SWASH).

Le questionnaire de suggestibilité à l'hypnose est disponible dans la partie « **Annexe 2** » du manuscrit. Les questionnaires d'incarnation et de la représentation visuelle sont communs aux études précédentes et disponibles dans la partie « matériels et méthodes » du manuscrit.

Les questions relatives à la sortie de corps et à l'influence de la stimulation sont indiquées dans le **Tableau IX**. L'objectif du questionnaire de « sortie de corps » était d'évaluer un score de sortie de corps en fonction des réponses subjectives des participants (voir Partie 5). L'objectif du questionnaire « d'influence de la stimulation », quant à lui, était de savoir si les participants étaient plus influencés par la stimulation électrique ou par la représentation visuelle lorsqu'ils évaluaient l'intensité de la stimulation électrique reçue.

Comme pour le questionnaire d'incarnation et celui de la représentation visuelle, les questions relatives à la sortie de corps et à l'influence de la stimulation ont été présentées dans un ordre randomisé dans l'environnement virtuel. Les participants répondaient à l'aide d'un joystick en déplaçant un curseur sur une échelle de 0 à 6 allant de « Fortement en désaccord » à « Tout à fait d'accord ».

Le questionnaire de sortie de corps a été proposé dans les conditions où le point de vue des participants était à la troisième personne (conditions SS 3PP et ASS 3PP de la **Figure 47**) après l'évaluation des seuils douloureux. Le questionnaire d'influence de la stimulation a été proposé dans les conditions où la représentation visuelle était présente de manière cohérente ou incohérente (ASS 1PP et ASS 3PP de la **Figure 47**) après l'évaluation des intensités électriques.

Tableau IX - Récapitulatif des questions présentées aux participants relatives à la sortie de corps et à l'influence de la stimulation.

Questionnaire	Intitulé des questions
Sortie de corps	J'avais l'impression de flotter dans les airs.
	J'avais l'impression d'être dans une position élevée dans la pièce.
	J'avais l'impression que le corps que je voyais était mon propre corps.
	J'avais l'impression que le corps que je voyais appartenait à quelqu'un d'autre.
	J'ai ressenti une connexion avec le corps, comme si je me regardais.
	J'avais l'impression d'avoir un corps invisible.
Influence de la stimulation	À quel point l'évaluation de vos sensations a-t-elle été influencée par l'intensité de la stimulation électrique ?
	À quel point l'évaluation de vos sensations a-t-elle été influencée par la sphère rouge ?

5.2.7. Détermination du score de sortie de corps

Il n'existe pas de consensus dans la littérature pour déterminer l'efficacité d'une sortie de corps. Nous avons donc décidé d'élaborer notre propre score de sortie de corps afin de nous donner la possibilité d'exclure des analyses les participants qui n'ont pas eu l'impression de sortir de leur corps durant la simulation.

Pour cela, nous nous sommes basés sur les réponses des participants au questionnaire de sortie de corps (cf. **Tableau IX** de la partie précédente) dans la condition sans représentation visuelle avec le point de vue à la troisième personne (SS 3PP). Étant donné qu'il existait plusieurs questions (donc plusieurs variables) relatives à la sortie de corps, nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) des réponses au questionnaire afin de réduire les dimensions des données multivariées. Nous avons fait le choix de garder uniquement la première composante principale étant donné que celle-ci représentait à elle seule 53,52% de la variance des données. Le coefficient d'ACP obtenu pour chaque question est indiqué dans le **Tableau X**.

Tableau X – Récapitulatifs des coefficients associés à chaque question relative au questionnaire de sortie de corps.

Qi	Intitulé de la question	Coefficient ACP
1	J'avais l'impression de flotter dans les airs.	0,1315
2	J'avais l'impression d'être dans une position élevée dans la pièce.	0,5268
3	J'avais l'impression que le corps que je voyais était mon propre corps.	-0,0991
4	J'avais l'impression que le corps que je voyais appartenait à quelqu'un d'autre.	-0,0742
5	J'ai ressenti une connexion avec le corps, comme si je me regardais.	0,4697
6	J'avais l'impression d'avoir un corps invisible.	-0,5072

Le niveau de sortie de corps individuel des participants correspondait donc à la somme des réponses multipliées par les coefficients des réponses respectives. Le score de sortie de corps ainsi obtenu s'étendait sur une échelle de -5,4948 à 9,1425 pour une amplitude de 14,6376.

Par soucis de clarté et de simplification, la valeur de 5,4948 a été additionné au score de chaque participant afin d'obtenir une échelle positive allant de 0 à 14,6376.

L'équation ci-dessous résume la formule utilisée pour obtenir le score de sortie de corps individuel (abrégé sous le terme de « OBE »).

$$OBE = \sum_{i=1}^6 (Réponse\ Q_i\ (de\ 0\ à\ 6) * Coefficient\ Q_i + 5,4948)$$

Avec OBE : niveau de sortie de corps ; Q_i : Question numéro i ; Coefficient Q_i : coefficient de la question numéro i .

5.3. Résultats

5.3.1. Impact de la représentation visuelle sur l'incarnation

5.3.1.1. Vérifications des prérequis

Cette troisième étude a nécessité deux prérequis pour répondre à nos hypothèses. Premièrement, et comme pour les études 1 et 2, les participants devaient être bien incarnés dans leur avatar lorsque leur point de vue était à la première personne. Deuxièmement, ils devaient avoir la sensation d'être bien sortis de leur corps virtuel et d'avoir gardé un fort lien de connexion avec celui-ci.

La première étape consistait alors à vérifier, pour chaque participant, que les niveaux d'incarnation étaient supérieurs à 3 sur 6 sur l'échelle d'incarnation dans la condition intracorporelle sans sphère (SS 1PP ; **Figure 50A**) et que les niveaux de sortie de corps étaient supérieurs à 7,3 sur 14,6 (**Figure 50C**).

La répartition des niveaux d'incarnation (**Figure 50A**) a montré que seul 1 participant sur les 36 avait une incarnation inférieure à la moyenne dans la condition sans sphère et à la première personne (SS 1PP). Ce participant a donc été exclu de l'analyse. La répartition des niveaux de sortie de corps (**Figure 50C**) indique, quant à elle, que 20 participants sur 35 n'ont pas eu l'impression de sortir de leur corps. Ils ont, eux aussi, été exclus des analyses.

De manière plus précise, la distribution des niveaux d'incarnation (**Figure 50B**) a montré que ces niveaux étaient très élevés dans les conditions où les participants étaient en vue à la première personne (SS 1PP et ASS 1PP) et beaucoup plus faibles dans les conditions où les participants étaient en vue à la 3^{ème} personne (SS 3PP et ASS 3PP).

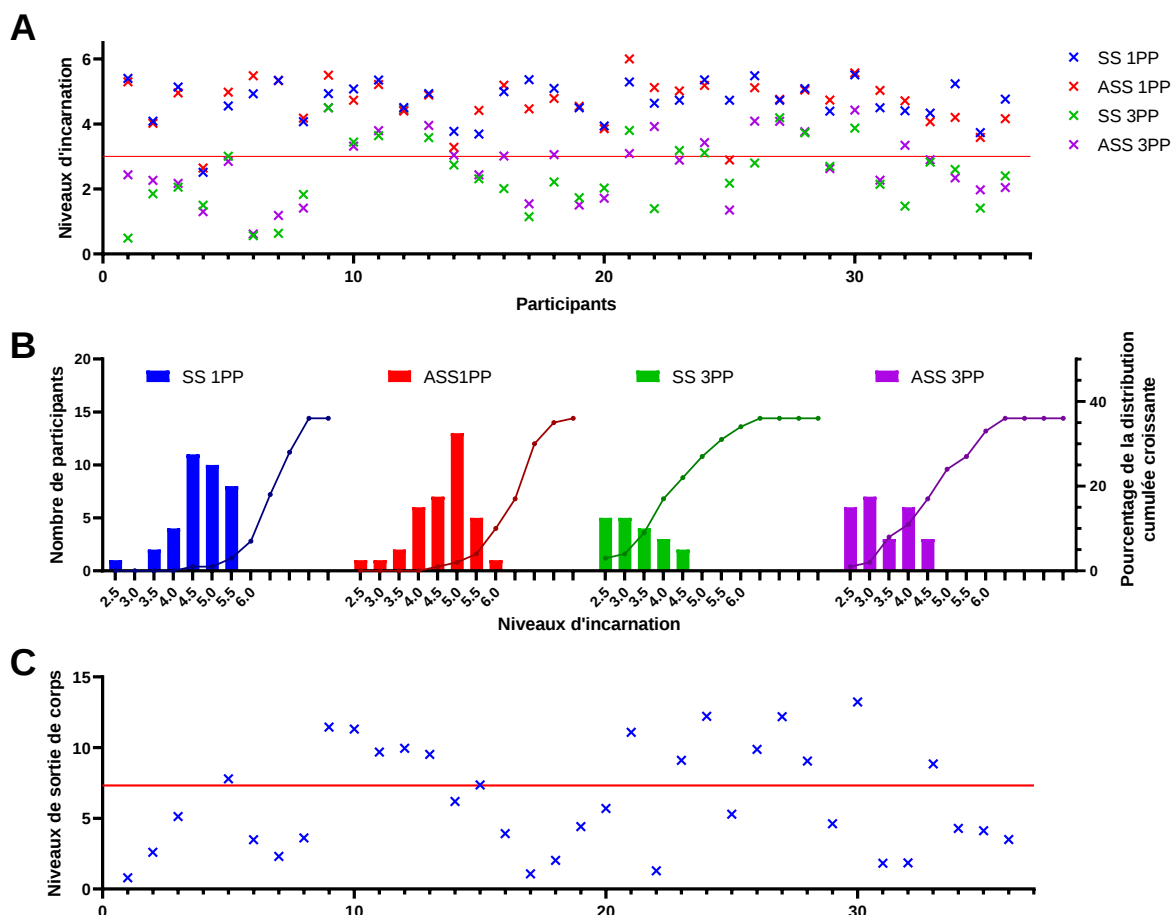


Figure 49 - Répartition et distribution des niveaux d'incarnation et des niveaux de sortie de corps pour chaque participant et chaque condition expérimentale. (A) Niveau d'incarnation de chaque participant pour chaque condition sur l'échelle d'incarnation. La ligne rouge indique la moyenne seuil de l'incarnation (3 sur 6) au-dessus de laquelle les sujets sont considérés comme bien incarnés. **(B) Distribution du nombre de participants en fonction de leurs scores d'incarnation pour chaque condition (histogramme).** Le pourcentage de la distribution cumulée croissante est présenté sur le même graphique et indiqué par les points reliés. **(C) Niveau de sortie de corps de chaque participant.** La ligne rouge indique la moyenne seuil de l'incarnation (7,3 sur 14,6) au-dessus de laquelle les sujets sont considérés comme bien sortis de leur corps. SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne.

Les résultats montrent donc que 97,22% des participants se sont bien incarnés dans leur avatar alors que seulement 42,86% des participants ont eu la sensation de sortir de leur corps.

5.3.1.2. Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle

Dans l'étude 1, nous avons comparé l'absence et la présence d'une représentation visuelle de taille unique sur l'incarnation. Dans cette troisième étude, nous avons pu évaluer l'impact de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle qui, cette fois-ci, grossissait de manière cohérente à l'intensité électrique.

Nous avons donc comparé les conditions sans représentation visuelle et les conditions avec représentation visuelle grossissante lorsque les participants avaient un point de vue à la première personne et à la troisième personne. Étant donné que des niveaux de sortie de corps des participants n'entraient pas en compte dans cette analyse, nous avons inclus les 35 sujets ayant un bon niveau d'incarnation.

De manière générale, nous avons constaté que les niveaux d'incarnation et de ses composantes étaient significativement plus élevés ($p < 0,0001$) dans les conditions à la première personne qu'à la troisième personne. Comme dans les études précédentes, nous avons analysé les différentes composantes de l'incarnation. Les tests de Friedman ont montré des différences significatives globales pour l'agentivité ($p < 0,001$, **Figure 51A**), la possession corporelle ($p < 0,001$, **Figure 51B**), la localisation de soi ($p < 0,001$, **Figure 51C**) et l'incarnation ($p < 0,001$, **Figure 51E**) mais pas pour l'apparence extérieure (**Figure 51D**). Les analyses post-hoc n'ont révélé aucune différence entre les conditions sans et avec représentation visuelle aussi bien en première personne qu'en troisième personne. Les scores moyens de l'évaluation de l'incarnation et de ces composantes, relatives aux différentes conditions, sont indiqués dans le **Tableau XI**.

Tableau XI – Résumé des scores d'évaluation de l'incarnation et de ses composantes en fonction de l'absence ou de la présence d'une représentation visuelle grossissante à la première personne ou à la troisième personne. SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; intra : intracorporelle (sur le bras) ; extra : extracorporelle (sur le mur).

	SS intra	ASS intra	SS extra	ASS extra
Agentivité	5,23 ± 0,69	5,10 ± 0,89	3,29 ± 1,22	3,51 ± 1,11
Possession corporelle	4,92 ± 0,90	4,96 ± 0,79	2,41 ± 1,95	2,90 ± 1,91
Localisation de soi	5,18 ± 0,76	5,17 ± 0,84	1,89 ± 1,25	2,05 ± 1,37
Apparence extérieure	2,65 ± 0,89	2,51 ± 1,10	2,46 ± 1,13	2,64 ± 1,27
Incarnation	4,76 ± 0,53	4,71 ± 0,70	2,52 ± 1,08	2,79 ± 1,03

5.3.1.3. Influence du point de vue

Nous avons voulu déterminer également si le point de vue avait une influence sur les niveaux d'incarnation et de ses composantes. Pour cela, nous avons comparé les conditions avec ou sans sphère lorsque les participants étaient à la première personne (1PP) ou à la troisième personne (3PP).

Comme indiqué précédemment, les tests de Friedman ont montré des différences significatives globales ($p < 0,0001$) pour l'agentivité (**Figure 51A**), la possession (**Figure 51B**), la localisation de soi (**Figure 51C**) et l'incarnation (**Figure 51E**). Les analyses post-hoc ont confirmé ces différences significatives ($p < 0,0001$) entre les conditions à la première personne et les conditions à la troisième personne (respectivement entre SS 1PP et SS 3PP et entre ASS 1PP et ASS 3PP). Seule la possession corporelle n'a montré aucune différence significative entre les différentes conditions.

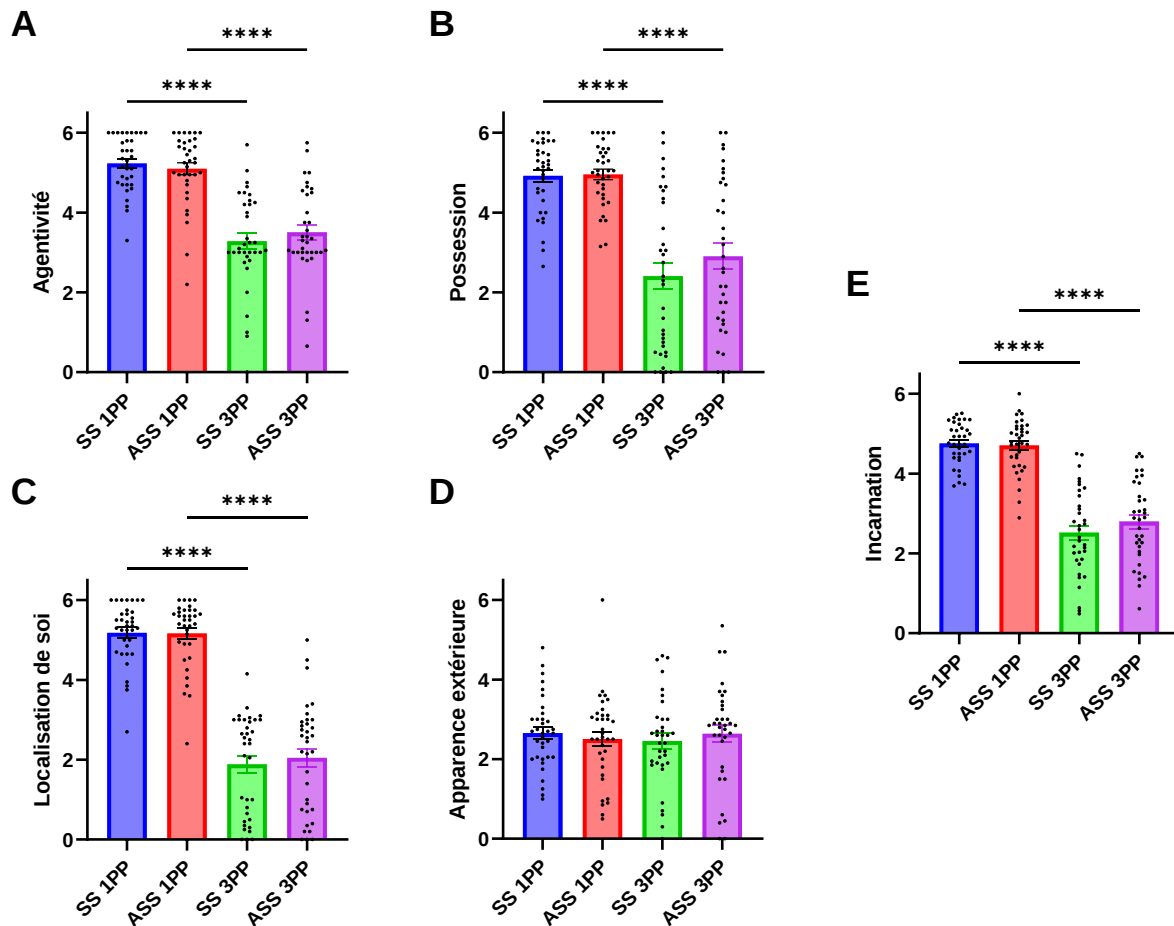


Figure 50 – Influence de la représentation visuelle sur les différentes composantes de l’incarnation à la première personne et à la troisième personne. Le point de vue à la troisième personne diminue l’agentivité (A), la possession (B), la localisation de soi (C) et l’incarnation (E). Aucune différence significative n’apparaît pour l’apparence extérieure (D). SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Nos résultats indiquent dans un premier temps que la seule présence d’une représentation visuelle grossissante sur le bras ou sur le mur n’a pas modulée les niveaux d’incarnation. En revanche, la position à la troisième personne diminuait fortement les niveaux d’agentivité, de possession corporelle, de localisation de soi et par conséquent les niveaux d’incarnation globale.

5.3.2. Impact de la représentation visuelle sur la douleur

5.3.2.1. Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle

Sur l'évaluation des seuils douloureux objectifs

Dans cette partie nous voulions déterminer si la présence d'une représentation visuelle capable de grossir avec la stimulation pouvait avoir un impact sur l'évaluation des seuils douloureux. Nous avons donc de nouveau comparé les conditions avec ou sans sphère lorsque les participants étaient en vue à la première personne et à la troisième personne. Dans cette analyse, un niveau élevé de sortie de corps était indispensable afin de tester nos hypothèses. Ainsi, seuls les 15 participants ayant eu un bon score de sortie de corps ont été inclus dans l'analyse.

Étant donné que les seuils douloureux suivaient une loi normale, une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a été effectuée. Les résultats ont montré un effet significatif global du facteur « représentation visuelle : absence versus présence » ($F(1,14) = 9,948$; $p = 0,007$; **Figure 52**). Les seuils douloureux étaient en effet globalement plus élevés dans les conditions à la troisième personne qu'à la première personne (SS 1PP + SS 3PP versus ASS 1PP + ASS 3PP). Les analyses post-hoc de Tukey ont confirmé une différence significative entre l'absence et la présence d'une sphère lorsque les participants étaient à la troisième personne (SS 3PP versus ASS 3PP : $p = 0,036$). Toutefois, aucune différence significative n'a été révélée en vue à la première personne.

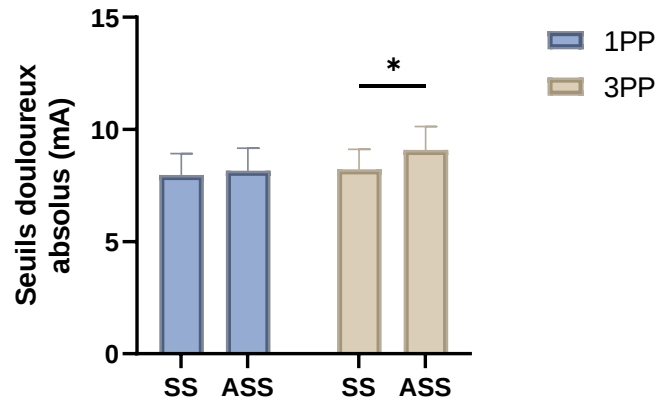


Figure 51 – Influence de la présence d’une représentation visuelle grossissante sur les seuils douloureux. Les conditions avec sphère synchrone grossissante ont des niveaux significativement plus élevés que les conditions sans sphère en vue à la troisième personne. SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

5.3.2.2. Influence du point de vue

Sur l’évaluation des seuils douloureux objectifs

Nous nous interrogeons également sur le fait qu’une sortie de corps pouvait moduler ou non les seuils douloureux. Nous avons donc comparé les seuils douloureux des 15 sujets ayant un bon niveau de sortie de corps lorsqu’ils étaient à la première personne versus à la troisième personne.

En plus du facteur « représentation visuelle : présence versus absence », l’ANOVA à mesures répétées a montré également un effet du facteur « localisation du point de vue : 1PP versus 3PP » ($F(1,14) = 12,82$; $p = 0,003$; **Figure 53**). De manière globale, les seuils douloureux sont plus élevés à la troisième personne qu’à la première personne (SS 1PP + ASS 1PP versus SS 3PP + ASS 3PP). Les analyses post-hoc n’ont cependant pas montré de différence au niveau local (SS 1PP versus SS 3PP et ASS 1PP versus ASS 3PP).

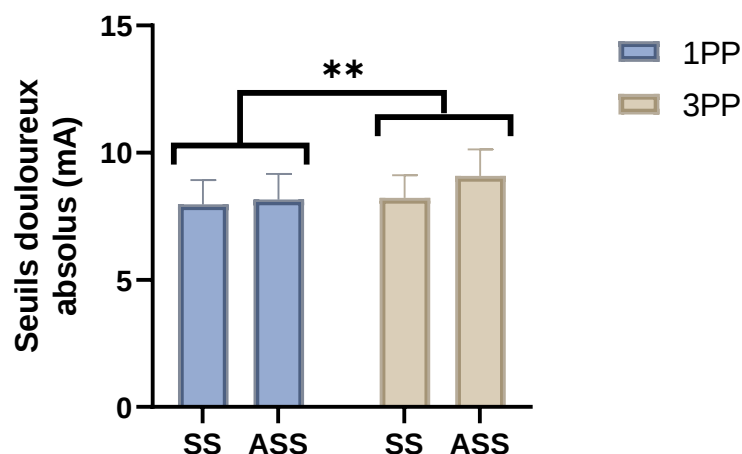


Figure 52 – Influence du point de vue sur les seuils douloureux. Les seuils douloureux sont plus élevés à la troisième personne qu’à la première personne SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

La présence d’une représentation visuelle grossissante augmente les seuils douloureux et engendre donc un effet analgésique (moins de douleur). Cet effet est principalement visible lorsque les participants ont l’impression d’être en dehors de leur corps et lorsqu’une représentation visuelle apparaît sur leur bras virtuel. Par ailleurs, nos résultats tendent à montrer que simuler une sortie de corps entraînerait également une diminution de la douleur.

Sur les sensations douloureuses subjectives

Nous avons vu que le point de vue modulait objectivement la douleur. Il était également pertinent de savoir s’il pouvait modifier la sensation subjective de douleur estimée par les participants en présence de la représentation visuelle.

Deux questions antagonistes ont été comparées pour répondre à cette hypothèse. La première était « J’ai eu l’impression que la douleur était dans mon bras » et la seconde était « J’ai eu l’impression que la douleur était hors de mon bras ». Il était intéressant de comparer les réponses des 15 sujets ayant eu l’impression d’être sortis de leur corps aux 20 autres qui n’avaient pas ressenti cette impression. Nous avons donc effectué des tests de Wilcoxon pour comparer les conditions deux à deux de groupes différents lorsque les données étaient appariées (**Figures 54A, 54B, 54E, 54F**) et des tests de Mann-Whitney lorsque les données étaient non appariées (**Figures 54C, 54D, 54G, 54H**).

La douleur dans le bras a été estimée de manière plus importante en vue à la première personne qu'en vue à la troisième personne. Cette différence significative a été montrée à la fois pour les participants ayant eu l'impression de sortir de leur corps (participants OBE) ($p = 0,003$; **Figure 54A**) et pour ceux n'ayant pas eu l'impression de sortir de leur corps (participants NON OBE) ($p = 0,0003$; **Figure 54B**). De plus, les participants OBE ont estimé de manière plus importante que la douleur était dans leur bras, par rapport aux participants NON OBE, lorsque le point de vue était à la troisième personne ($p = 0,008$; **Figure 54D**) mais pas à la première personne (**Figure 54C**).

La question antagoniste a montré des résultats cohérents et inversés. En effet, la douleur a été surestimée comme étant localisée hors du bras lorsque le point de vue était à la troisième personne pour les participants OBE ($p = 0,030$; **Figure 54E**) et NON OBE ($p = 0,0008$; **Figure 54F**). Une tendance a également montré que les participants OBE surestimaient la douleur hors du bras par rapport aux participants NON OBE lorsque le point de vue était à la troisième personne ($p = 0,093$; **Figure 54H**) mais pas à la première personne (**Figure 54G**).

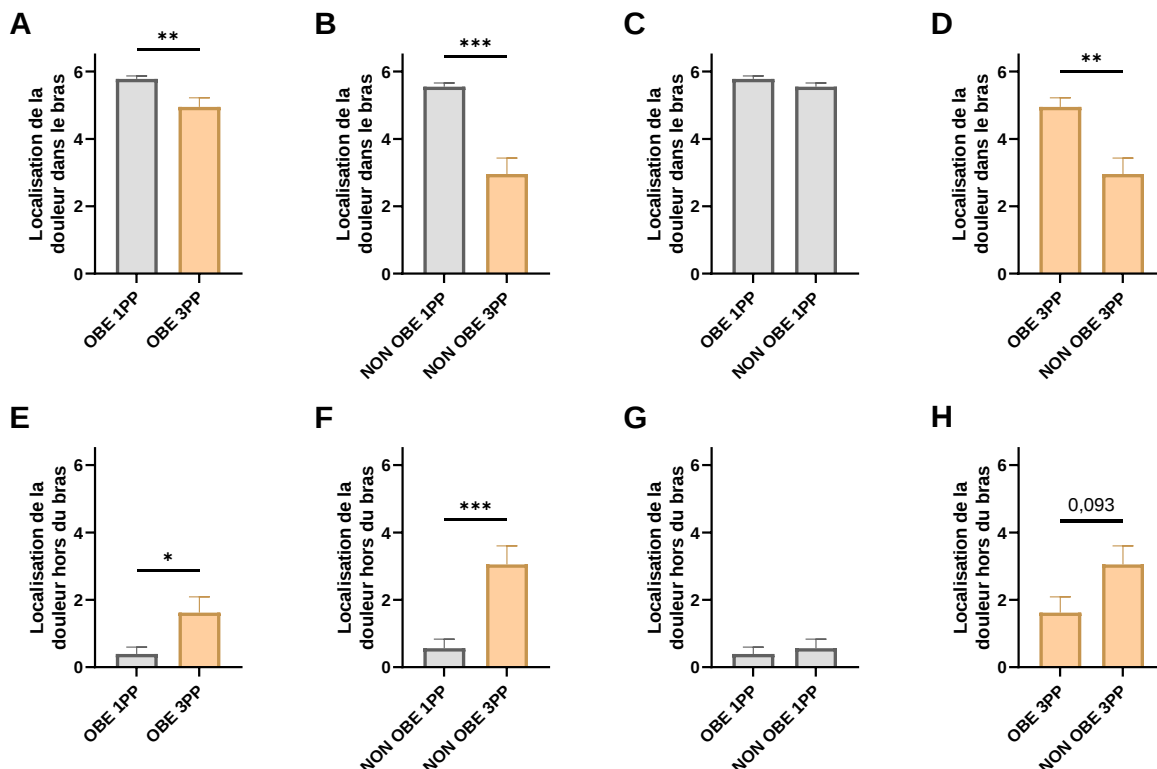


Figure 53 – Influence du point de vue sur l'évaluation de la localisation de la douleur en présence d'une représentation visuelle dans le bras ou hors du bras et entre les participants OBE et non OBE (conditions ASS 1PP et ASS 3PP). Pour les sujets OBE (**A et E**), pour les sujets non OBE (**B et F**), pour le point de vue à la première

personne (**C et G**) et pour le point de vue à la troisième personne (**D et H**). OBE : participants ayant eu l'impression de sortir de leur corps ; NON OBE : participants n'ayant pas eu l'impression de sortir de leur corps ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Nos résultats indiquent que le point de vue à la troisième personne diminue l'estimation de la douleur dans le bras et augmente l'estimation de la douleur hors du bras. De plus, l'estimation de la douleur dans le bras est moins importante chez les participants NON OBE que chez les participants OBE. A l'inverse, l'estimation de la douleur hors du bras est plus importante chez les sujets qui ont eu l'impression d'être sortis de corps.

Sur son association à la douleur

Étant donné que le point de vue avait une influence sur les seuils douloureux objectifs et sur les sensations douloureuses subjectives, il était intéressant de s'interroger sur son influence sur la représentation visuelle. A-t-elle été associée à la douleur ou existe-il un rapport entre la représentation visuelle et la douleur ?

Pour répondre à ces interrogations, nous avons analysé deux questions liées : « J'ai eu l'impression que la sphère rouge était ma douleur » et « J'ai eu l'impression que la sphère rouge n'avait aucun rapport avec ma douleur ». Nous avons comparé leurs évaluations par les participants lorsque le point de vue était à la première personne et lorsqu'il était à la troisième personne à l'aide des mêmes analyses statistiques que précédemment.

Lorsque le point de vue était à la première personne (1PP), la représentation visuelle apparaissant sur le bras virtuel a bien été associée à la douleur (environ 4 sur 6) pour les participants OBE (**Figure 55A**) et les participants NON OBE (**Figure 55B**). Nous pouvons noter qu'aucune différence n'existait entre les deux groupes à la première personne (**Figure 55C**). Lorsque le point de vue était à la troisième personne (3PP), la représentation visuelle a été, de nouveau, bien associée à la douleur pour les participants OBE (**Figure 55A**) mais pas pour les participants NON OBE (**Figure 55B**) où une différence significative a été révélée ($p = 0,040$). Bien que non significatif, nous avons identifié que lorsque les sujets étaient à la troisième personne, et qu'ils avaient ressenti l'expérience de sortie de corps, ils avaient tendance à mieux associer la sphère à la douleur par rapport aux sujets qui avaient des scores d'OBE faible ($p = 0,069$; **Figure 55D**).

Concernant la seconde question, les niveaux globaux étaient, de manière cohérente, relativement bas (inférieurs à 2 sur 6, quelles que soient les conditions expérimentales). Aucune différence significative n'a été révélée entre les deux points de vue (**Figures 55E et 55F**) et entre les deux groupes de participants (**Figures 55G et 55H**).

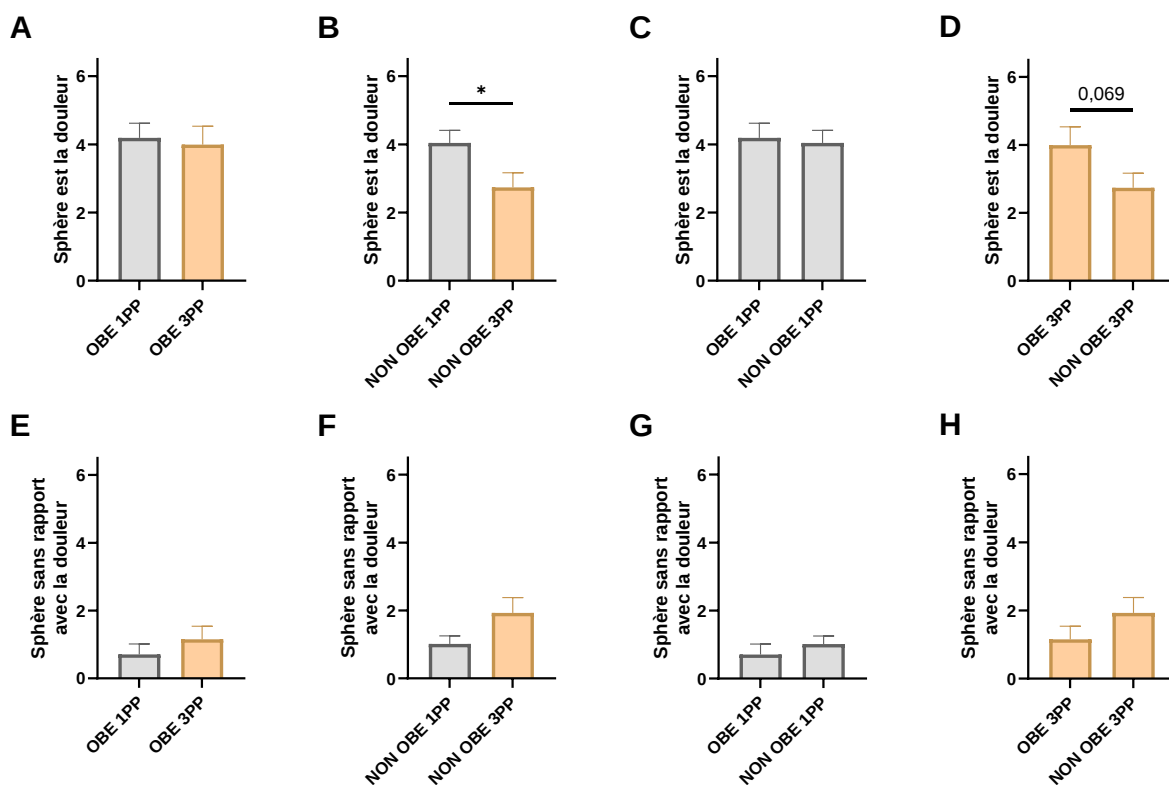


Figure 54 – Influence du point de vue sur l'association de la représentation visuelle à la douleur ou comme ayant un rapport avec la douleur. En vue à la première personne, les participants OBE et NON OBE estiment que la représentation visuelle est leur douleur (**A et B**) et aucune différence n'apparaît entre les deux groupes (**C**). En vue à la troisième personne, les participants OBE estiment que la représentation visuelle est leur douleur (**A**) alors que ce n'est pas le cas pour les participants NON OBE (**B**). Des réponses significatives existent d'ailleurs entre les deux groupes (**D**). En vue à la première personne, les participants OBE et NON OBE estiment très faiblement que la représentation visuelle est sans rapport avec la douleur (**E et F**) et aucune différence n'apparaît entre les réponses des deux groupes en vue à la première personne (**G**) et en vue à la troisième personne (**H**). OBE : participants ayant eu l'impression de sortir de leur corps ; NON OBE : participants n'ayant pas eu l'impression de sortir de leur corps ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (*p<0,05 ; **p<0,01 ; ***p<0,001 ; ****p<0,0001).

Nos résultats indiquent que les participants (OBE et NON OBE) ont associé la représentation visuelle qui apparaissait sur le bras virtuel à la douleur lorsque le point de vue était à la première personne. Les participants qui ont eu la sensation de sortir de leur corps (OBE) ont

également associé la représentation visuelle à leur douleur lorsqu'ils étaient à la troisième personne alors que ce n'était pas le cas pour les participants n'ayant pas eu la sensation de sortir de leur corps (NON OBE). Tous les participants ont toutefois estimé que la représentation visuelle avait un lien fort avec la douleur quels que soient les points de vue.

Sur son interprétation comme cause ou conséquence de la douleur

Étant donné qu'une association entre la représentation visuelle et la douleur a été identifiée, il était intéressant de déterminer si les participants estimaient que cette représentation visuelle pouvait être une cause ou une conséquence de la douleur.

Les deux questions antagonistes « J'avais l'impression que la sphère rouge était causée par la douleur » et « J'avais l'impression que la douleur était causée par la sphère rouge » ont été comparées en vues à la première et à la troisième personne.

De manière générale, les réponses des participants étaient partagées entre cause et conséquence. Aucune différence n'est apparue entre les points de vue lorsque la sphère était estimée comme étant causée par la douleur (**Figures 56A et 56B**) et entre les deux groupes de participants (**Figures 56C et 56D**). De même, aucune différence n'a été trouvée entre les points de vue lorsque la douleur était estimée comme étant causée par la sphère (**Figures 56E et 56F**). Toutefois une différence entre les deux groupes OBE et NON OBE a été montrée du point de vue de la première personne ($p = 0,04$; **Figure 56G**) mais pas du point de vue de la troisième personne (**Figure 56H**).

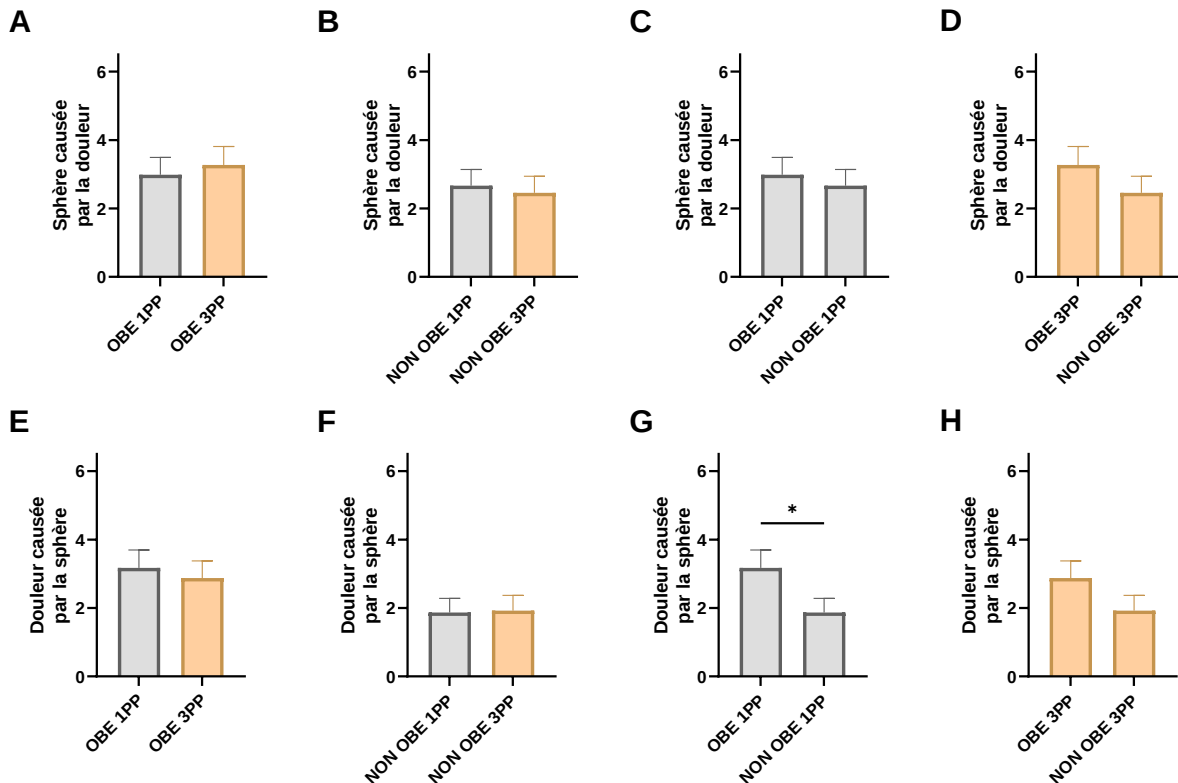


Figure 55 – Influence du point de vue sur l’interprétation de la représentation visuelle comme cause ou conséquence de la douleur. Le point de vue n’influence pas le fait que la sphère était perçue comme étant causée par la douleur (**A et B**) ou le fait que la douleur était causée par la sphère (**E et F**). Les participants OBE et NON OBE ont été influencés de manière identique pour le point de vue à la première personne pour la première question (**C**) et pour le point de vue à la troisième personne pour les deux questions (**D et H**). Toutefois, les participants NON OBE ont plus faiblement estimés que la douleur était causée par la sphère en vue à la première personne (**G**). OBE : participants ayant eu l’impression de sortir de leur corps ; NON OBE : participants n’ayant pas eu l’impression de sortir de leur corps ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Ces résultats montrent que les participants ont, soit considéré la représentation visuelle comme étant une cause autant qu’une conséquence de la douleur, soit ils ont estimé que la représentation visuelle n’était ni une cause, ni une conséquence de la douleur.

5.3.3. Impact de la représentation visuelle sur l'intensité des perceptions tactiles ressenties en réponse à des stimulations électriques non douloureuses

L'objectif de cette nouvelle partie est d'évaluer l'influence de la présence d'une représentation visuelle, son grossissement et sa vitesse de grossissement, sur le ressenti somesthésique induit par des stimulations électriques non douloureuses. Cette évaluation était subjective puisqu'elle faisait appel aux réponses des questionnaires des participants.

5.3.3.1. Influence de l'absence et de la présence d'une représentation visuelle

Dans cette étude, nous avons montré que la présence d'une représentation visuelle modulait les seuils douloureux. Nous avons voulu savoir s'il en était de même pour les intensités ressenties et évaluées subjectivement par les participants. Nous avons alors comparé les conditions sans représentation visuelle avec celle où la représentation visuelle apparaissait, en fonction des intensités électriques. Nous avons comparé ces résultats pour les participants OBE (**Figure 57A**) et NON OBE (**Figure 57B**) lorsque le point de vue était à la première personne et à la troisième personne. Les comparaisons des conditions ont été effectuées à l'aide d'une ANOVA à trois facteurs. Le premier facteur était « Représentation visuelle : présence versus absence », le second était « Intensité électrique : 25% vs 50% vs 60% vs 85% » et enfin, le dernier facteur (qui sera plus amplement détaillé dans le troisième point de cette partie) était « Point de vue : 1PP versus 3PP ».

De manière générale, la présence d'une représentation visuelle a engendré une surévaluation de l'intensité de la stimulation électrique pour tous les participants (OBE et NON OBE) aussi bien en vue à la première personne qu'en vue à la troisième personne. De façon cohérente, les analyses ont indiqué un effet significatif du facteur « intensité électrique : 25% vs 50% vs 60% vs 85% » ($p < 0,0001$) pour les participants OBE (**Figure 57A**) et NON OBE (**Figure 57B**).

Le facteur « représentation visuelle : absence versus présence » était significatif pour les participants OBE ($p = 0,049$) et les participants NON OBE ($p = 0,001$). Un effet d'interaction a été identifié entre les facteurs « représentation visuelle » et « intensité électrique » (respectivement $p = 0,0003$ et $p = 0,0004$). Les analyses post-hoc ont confirmé des différences

significatives à l'échelle locale en première personne entre les conditions où la sphère était présente et celles où elle était absente. Ces différences ont été montrées pour l'intensité de 85% ($p = 0,026$; **Figure 57A**) pour les participants OBE et pour l'intensité de 60% ($p = 0,010$; **Figure 57B**) pour les participants NON OBE.

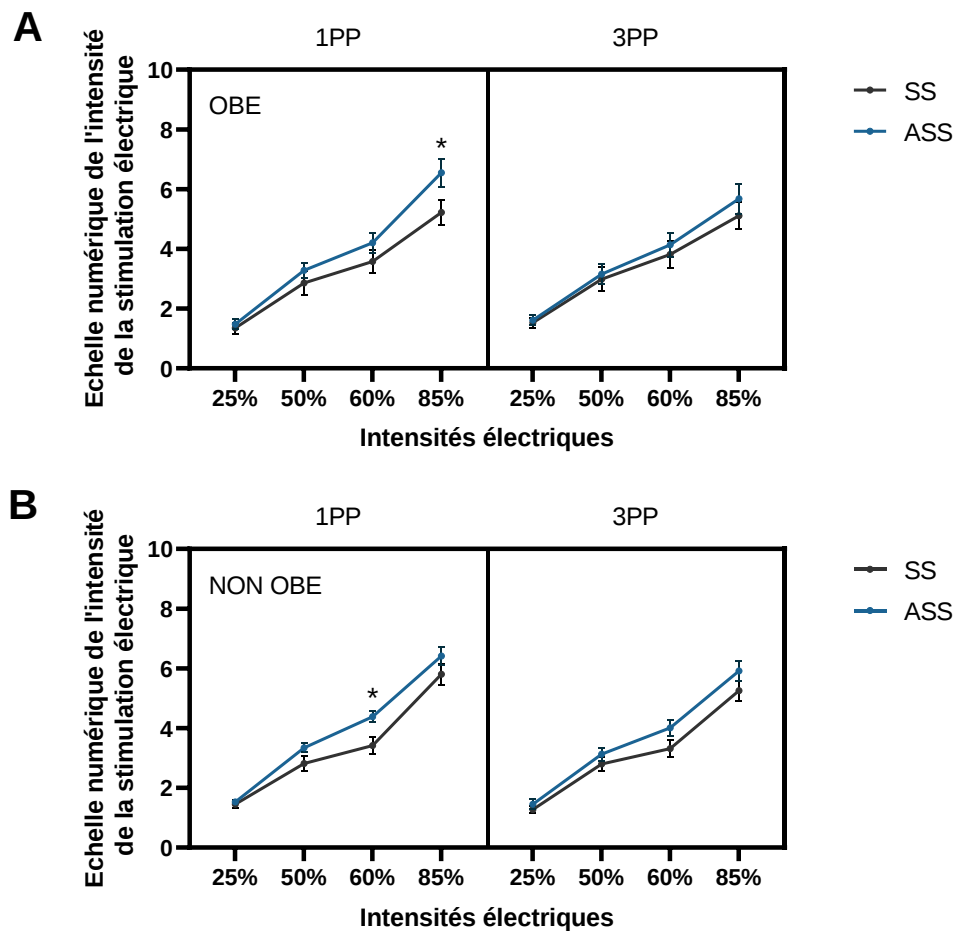


Figure 56 – Influence de la présence d'une représentation visuelle sur l'intensité électrique ressentie pour les participants ayant eu l'impression de sortir de leur corps (A) et pour les participants n'ayant pas eu l'impression de sortir de leur corps (B). OBE : participants ayant eu l'impression de sortir de leur corps ; NON OBE : participants n'ayant pas eu l'impression de sortir de leur corps ; SS : sans sphère ; ASS : avec sphère synchrone ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Nos résultats indiquent que la présence d'une représentation visuelle sur le bras à la première personne entraîne une surestimation, chez les participants, de l'intensité de la stimulation électrique.

Nous avons également voulu déterminer si les participants estimaient être plus influencés par la représentation visuelle ou par la stimulation électrique lorsqu'ils évaluaient les intensités électriques. Pour cela, nous avons proposé deux questions antagonistes après le passage des conditions où la représentation visuelle était présente (ASS 1PP et ASS 3PP). La première question était « A quel point l'évaluation de vos sensations a été influencée par l'intensité de la stimulation électrique ? » et la seconde « A quel point l'évaluation de vos sensations a été influencée par la sphère rouge ? ». Nous avons comparé les questions lorsque le point de vue était à la première personne et à la troisième personne.

D'une manière générale, les participants ont été plus influencés par la stimulation électrique (niveaux supérieurs à 4 sur 6 ; **Figures 58E-58H**) que par la sphère rouge (niveaux inférieurs à 4 sur 6 ; **Figures 58A-58D**). De manière plus précise, le point de vue a modulé l'influence de la sphère rouge pour les participants NON OBE. En effet, l'influence de la sphère rouge était significativement plus importante lorsqu'ils étaient en vue à la première personne qu'en vue à la troisième personne ($p = 0,012$; **Figure 58B**). Cette observation n'a cependant pas été retrouvée pour les participants OBE (**Figure 58A**). De plus, aucune différence n'a été identifiée entre les participants OBE et NON OBE pour les deux points de vue (**Figures 58C et 58D**).

L'influence de la stimulation électrique n'a montré aucune différence significative entre les vues à la première et troisième personne. Toutefois, les participants OBE ont été plus influencés par la stimulation électrique lorsqu'ils étaient en troisième personne que les participants NON OBE (**Figure 58H**).

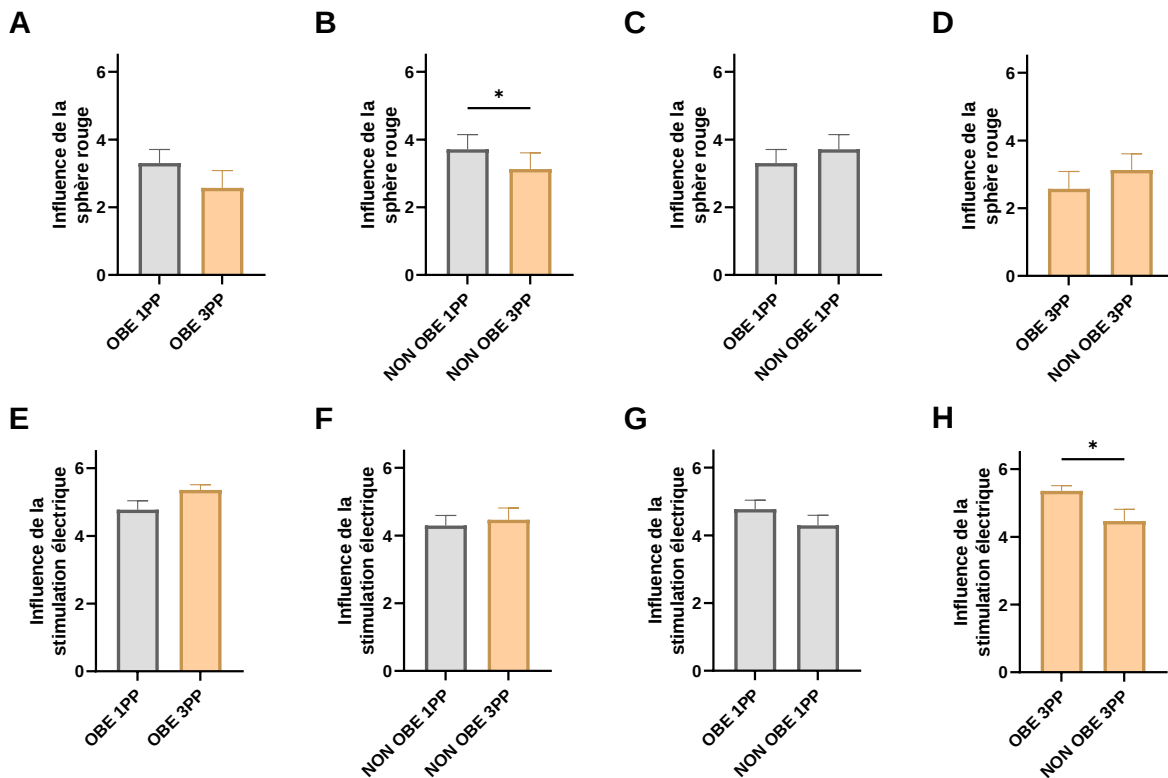


Figure 57 – Comparaison des influences de la représentation visuelle et de la stimulation électrique en fonction des participants et des points de vue en présence d’une représentation visuelle (ASS 1PP et ASS 3PP). Le point de vue n’a pas modulé les estimations de l’influence de la sphère (A) et de l’influence de la stimulation électrique (E). Le point de vue a modulé les estimations de l’influence de la sphère pour les participants NON OBE (B) mais pas pour l’influence de la stimulation électrique (F). Aucune différence n’a été trouvée en vue à la première personne pour les participants OBE et NON OBE (C et G). Une différence significative a été trouvée en vue à la troisième personne entre les participants OBE et NON OBE pour l’influence de la stimulation électrique (H) mais pas pour l’influence de la sphère (D). OBE : participants ayant eu l’impression de sortir de leur corps ; NON OBE : participants n’ayant pas eu l’impression de sortir de leur corps ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne. Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Nos résultats indiquent que les participants ont estimé qu’ils étaient plus influencés par la stimulation électrique que par la représentation visuelle lorsqu’il s’agissait d’évaluer les intensités électriques. De plus, les participants ayant eu l’impression de sortir de leur corps (OBE) ont été plus influencés par la stimulation électrique lorsqu’ils étaient à la troisième personne en comparaison des participants n’ayant pas eu l’impression de sortir de leur corps (NON OBE). Par ailleurs, l’influence de la sphère rouge était plus importante en vue à la première personne qu’en vue à la troisième personne.

5.3.3.2. Influence du grossissement d'une représentation visuelle

Nous avons montré que la présence d'une représentation visuelle avait un impact sur l'intensité électrique et nous voulions savoir s'il en était de même concernant sa taille (son grossissement).

Pour rappel, nous avons fait apparaître trois grossissements différents pour une même intensité électrique délivrée. Deux grossissements étaient estimés comme incohérents (soit plus petit, soit plus grand) et un grossissement était considéré comme cohérent. Dans la présentation des résultats ci-après, ces conditions seront abrégées sous les termes « $S = E$ » lorsque la taille de la sphère est cohérente à l'intensité électrique, « $S < E$ » lorsque la taille de la sphère est incohérente et le grossissement est plus petit et « $S > E$ » lorsque la taille de la sphère est incohérente et le grossissement est plus grand.

Nous avons relevé les estimations d'intensité électrique des participants dans les conditions où la représentation visuelle était incohérente (dans les conditions ASS 1PP et ASS 3PP). Pour chaque participant et pour chaque pourcentage d'intensité (25%, 50%, 60% et 85%), nous avons séparé les données en fonction du grossissement de la représentation visuelle ($S = E$, $S < E$ et $S > E$). Nous avons ensuite moyenné les données de chaque grossissement et chaque pourcentage d'intensité. A titre d'exemple, pour un pourcentage d'intensité électrique de 25% et un pourcentage de grossissement de 25%, nous avons moyenné 7 données (4 + 3) (**Tableau XII**) alors que pour un pourcentage d'intensité électrique de 85% et un pourcentage de grossissement de 60%, nous avons moyenné 3 données (**Tableau XII**). Nous avons ainsi obtenu une donnée moyenne des estimations pour $S = E$, $S < E$ et $S > E$ pour chaque participant et chaque pourcentage d'intensité électrique. De plus, et comme dans la première partie, les comparaisons ont ensuite été effectuées entre les participants OBE et NON OBE et entre les points de vue à la première et à la troisième personne à l'aide d'une ANOVA à trois facteurs. Les facteurs étaient, en fonction de la condition, « Grossissement : identique versus supérieur » ou « Grossissement : identique versus inférieur », « Point de vue : 1PP versus 3PP » et « intensité électrique : 50% versus 60% versus 85% ».

Tableau XII - Récapitulatif du nombre de stimulations électriques délivrées en fonction des pourcentages d'intensité électrique et des pourcentages de grossissement de la représentation visuelle. Le nombre de stimulations délivrées lors de la première phase est indiqué en vert, le nombre de stimulations d'étalonnage est indiqué en rouge et le nombre de stimulations délivrées lors de la seconde phase est indiqué en bleu.

Stimulation électrique \ Stimulation visuelle	10%	25%	50%	60%	85%	95%
10%	1					
25%		4 3	3			
50%		3	4 3	3		
60%			3	4 3	3	
85%				3	4 3	
95%						1

Comparaison du grossissement incohérent inférieur ($S < E$) par rapport au grossissement cohérent ($S = E$)

De manière générale, les estimations de l'intensité électrique étaient moins élevées lorsque le grossissement de la représentation visuelle était inférieur à la stimulation électrique imposée à la fois pour les participants OBE (**Figure 59A**) et les participants NON OBE (**Figure 59B**).

Un effet significatif global a été identifié pour le facteur « intensité : 50% versus 60% versus 85% » (OBE : $F(1.696, 23.75) = 118$; $p < 0,0001$ et NON OBE : $F(1.241, 23.58) = 119,2$; $p < 0,0001$). De même, un effet significatif global a été trouvé pour le facteur « grossissement : identique versus supérieur » pour les participants OBE ($F(0.863, 12.09) = 17,98$; $p = 0,002$; **Figure 59A**) et les participants NON OBE ($F(0.788, 14.98) = 23,51$; $p = 0,0004$; **Figure 59B**). Les analyses post-hoc n'ont toutefois pas révélé de différence significative à l'échelle locale entre les différents grossissements pour les participants OBE (**Figure 59A**) et NON OBE (**Figure 59B**).

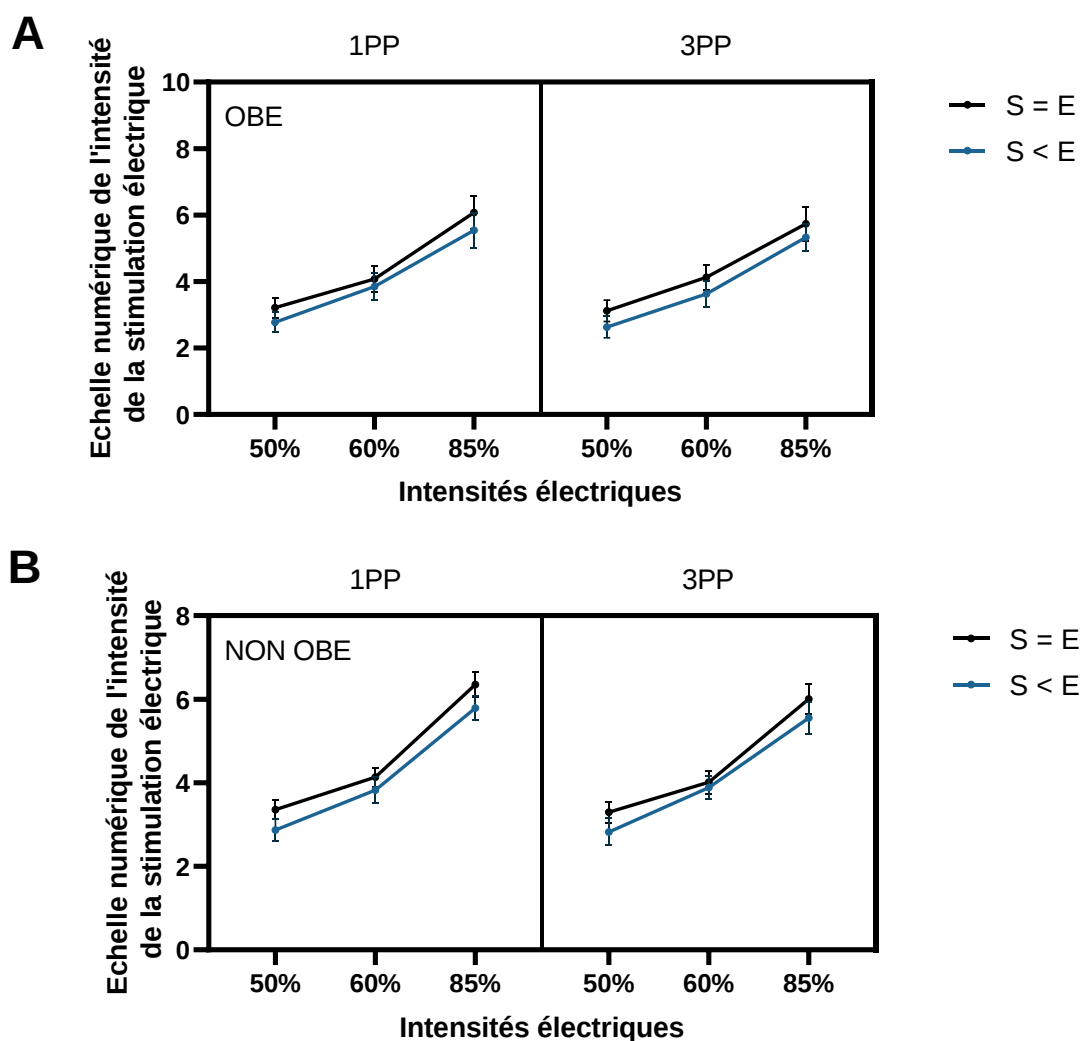


Figure 58 – Comparaison des intensités électriques estimées par les participants en fonction des pourcentages de stimulations électriques délivrées (50% versus 60% versus 85%), du point de vue (1PP versus 3PP) et des grossissements des représentations visuelles ($S = E$ versus $S < E$). Pour les participants OBE (A) et les participants NON OBE (B). Les comparaisons sont présentées d'une part pour les points de vue à la première personne (1PP) et à la troisième personne (3PP) et d'autre part, en fonction des grossissements des représentations visuelles incohérents (inférieurs aux stimulations) et cohérents (identiques aux stimulations). OBE : participants ayant eu l'impression de sortir de leur corps ; NON OBE : participants n'ayant pas eu l'impression de sortir de leur corps ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne.

Comparaison du grossissement incohérent supérieur ($S > E$) par rapport au grossissement cohérent ($S = E$)

De manière générale, les estimations de l'intensité électrique étaient plus élevées lorsque le grossissement de la représentation visuelle était supérieur au grossissement cohérent à la

stimulation délivrée à la fois pour les participants OBE (**Figure 60A**) et les participants NON OBE (**Figure 60B**).

Un effet significatif global a été trouvé pour le facteur « intensité : 25% versus 50% versus 60% » (OBE : $F(1.901,26.61) = 96$; $p < 0,0001$ et NON OBE : $F(1.441,27.38) = 155.9$; $p < 0,0001$). De même, un effet significatif global a été identifié pour le facteur « grossissement : identique versus supérieur » pour les participants NON OBE ($F(0.784,14.89) = 8,333$; $p = 0,0154$; **Figure 60B**) et une tendance pour les participants OBE ($F(0.53,7.417) = 6,008$; $p = 0,054$; **Figure 60A**). Les analyses post-hoc n'ont toutefois pas montré de différences significatives entre les différents grossissements pour les participants OBE (**Figure 60A**) et NON OBE (**Figure 60B**).

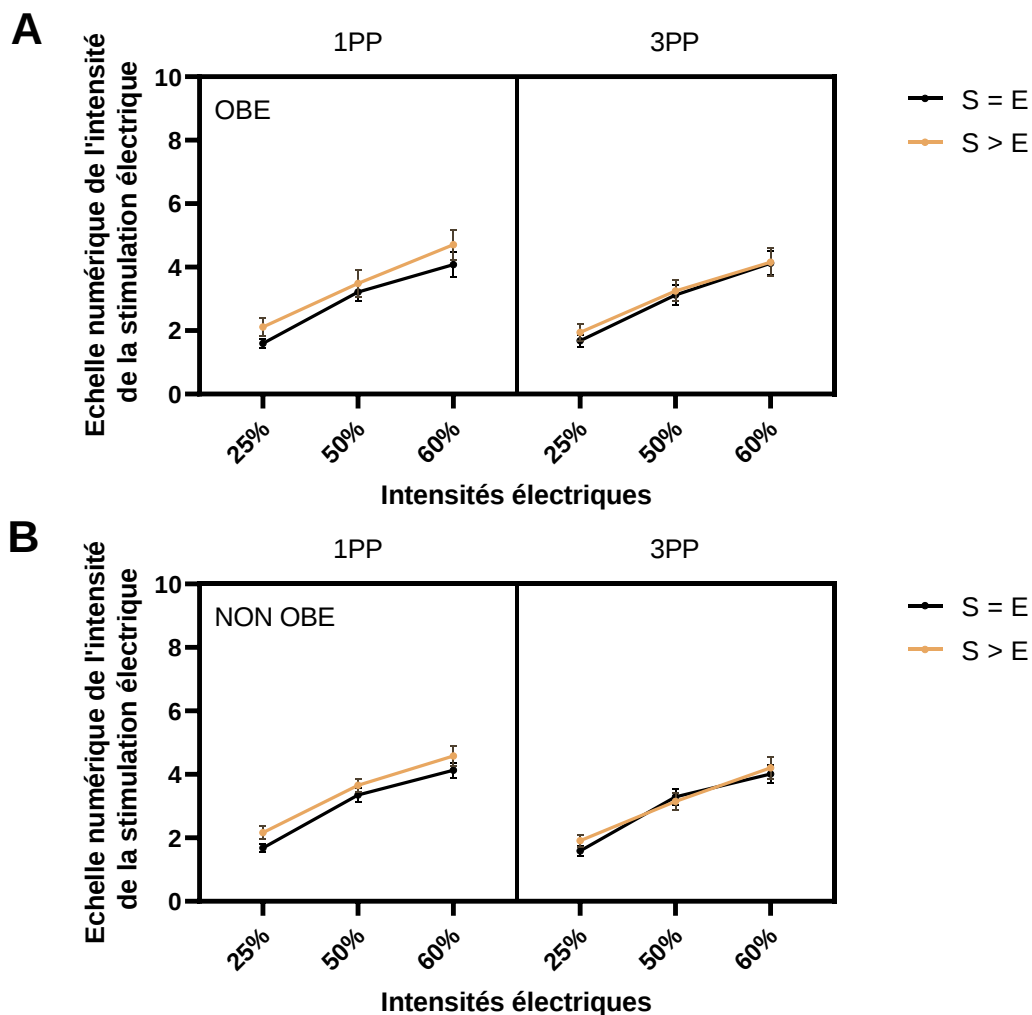


Figure 59 - Comparaison des intensités électriques estimées par les participants en fonction des pourcentages de stimulations électriques délivrées (25% versus 50% versus 60%), du point de vue (1PP versus 3PP) et des grossissements des représentations visuelles (S = E versus S > E). Pour les participants OBE (A) et les participants

NON OBE (**B**). OBE : participants ayant eu l'impression de sortir de leur corps ; NON OBE : participants n'ayant pas eu l'impression de sortir de leur corps ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne.

Nos résultats indiquent que le grossissement d'une représentation visuelle a une influence sur l'évaluation des intensités électriques ressenties par les participants. En effet, une sphère plus grosse augmente les évaluations d'intensité et une sphère plus petite diminue les évaluations des intensités électriques délivrées.

Comme précédemment, nous voulions déterminer si les participants étaient plus influencés par la stimulation électrique ou par la sphère rouge puisque dans cette condition, et pour une même intensité électrique délivrée, les sphères rouges avaient trois grossissements différents. Notre objectif était donc de comparer ces influences lorsque la taille des sphères étaient cohérentes ou incohérentes à l'intensité de la stimulation électrique. Nous avons donc comparé les réponses aux questions des participants (OBE et NON OBE) lorsqu'ils étaient à la première et troisième personne.

Les résultats indiquent que les participants ont, comme précédemment, été plus influencés par la stimulation électrique que par la sphère rouge (**Figures 61E et 61F versus 61A et 61B**). Un effet significatif global du point de vue a été trouvé pour les participants NON OBE concernant l'influence de la stimulation électrique ($p = 0,014$; **Figure 61B**) et de la sphère ($p = 0,005$; **Figure 61F**). L'influence de la sphère était, en effet, plus importante en vue à la première personne et l'influence de la stimulation électrique était plus importante en vue à la troisième personne. En outre, aucune différence n'a été trouvée entre les participants OBE vs NON OBE (**Figures 61C, 61D, 61G et 61H**) et entre les vues à la première et troisième personne pour l'influence de la sphère (**Figure 61A**) et de la stimulation électrique (**Figure 61E**).

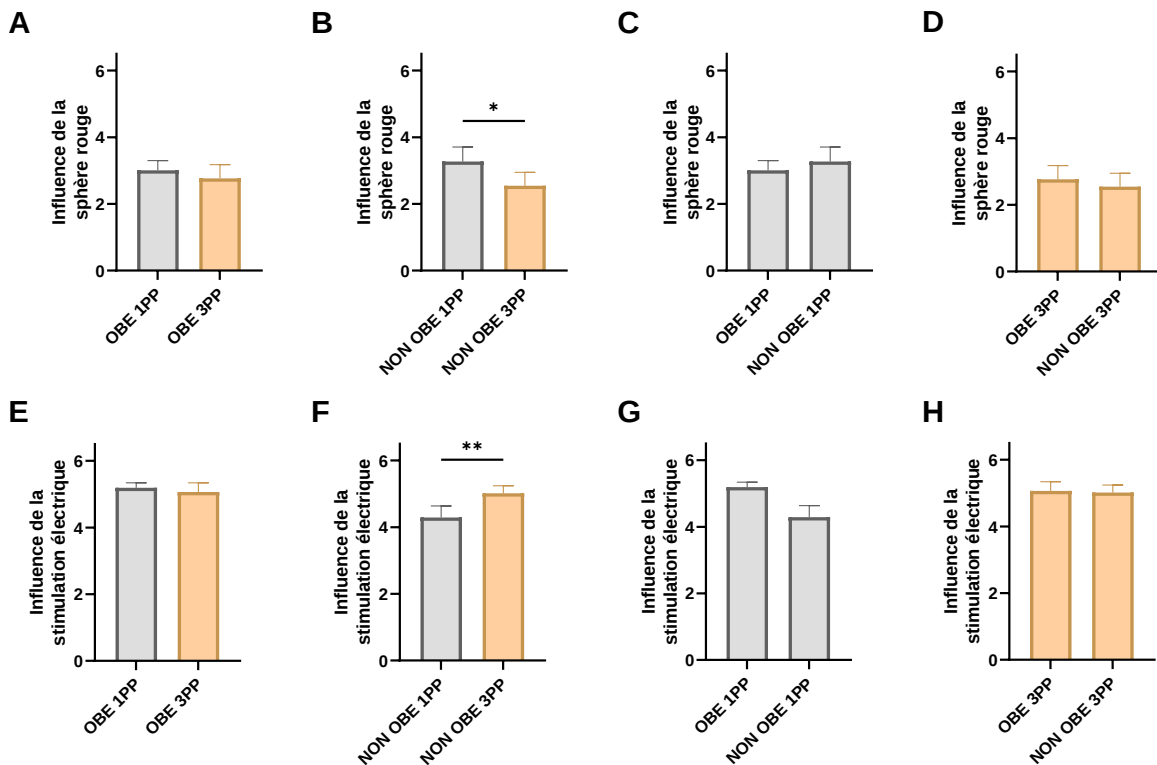


Figure 60 – Comparaison des influences de la représentation visuelle et de la stimulation électrique en fonction des participants OBE et NON OBE et des points de vue. Le point de vue n’a pas modulé les estimations de l’influence de la sphère (A) et de l’influence de la stimulation électrique (E). Le point de vue a modulé les estimations de l’influence de la sphère pour les participants NON OBE (B) et l’influence de la stimulation électrique (F). Aucune différence n’a été trouvée en vue à la première personne pour les participants OBE et NON OBE (C et G) et en vue à la troisième personne (D et H). Les astérisques indiquent les comparaisons significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$).

Nos résultats indiquent que les participants ont principalement été influencés par la stimulation électrique pour évaluer l’intensité des stimulations qui leur étaient délivrées. Par ailleurs, lorsqu’ils étaient en vue à la première personne, les participants NON OBE ont estimé que la sphère avait eu plus d’influence que la stimulation électrique pour déterminer l’intensité de la stimulation délivrée.

5.3.3.3. Influence de la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle

Nous avons précédemment montré que la présence d'une représentation visuelle avait un effet sur l'estimation des intensités électriques délivrées et que le grossissement avait tendance à les influencer également. Nous voulions donc à présent déterminer si la vitesse de grossissement avait, elle aussi, un impact.

Si on fait l'hypothèse que la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle n'influence pas l'évaluation des intensités électriques des participants, alors les différents écarts (E) d'estimations des intensités de stimulation (sur l'échelle numérique), entre un grossissement A et un grossissement B, aux différents pourcentages d'intensité électrique (25%, 50%, 60% et 85%), doivent être égaux ($E_{25\%} = E_{50\%} = E_{60\%} = E_{85\%}$) comme indiqué dans la **Figure 62A**.

Inversement, si on fait l'hypothèse que la vitesse de grossissement d'une représentation visuelle influence l'évaluation des intensités électriques délivrées aux participants, alors les différents écarts (E) d'estimations des intensités de stimulation (sur l'échelle numérique), entre le grossissement A et le grossissement B, aux différents pourcentages d'intensité électrique, doivent être différents ($E_{25\%} \neq E'_{50\%} \neq E''_{60\%} \neq E'''_{85\%}$) comme indiqué dans la **Figure 62B**.

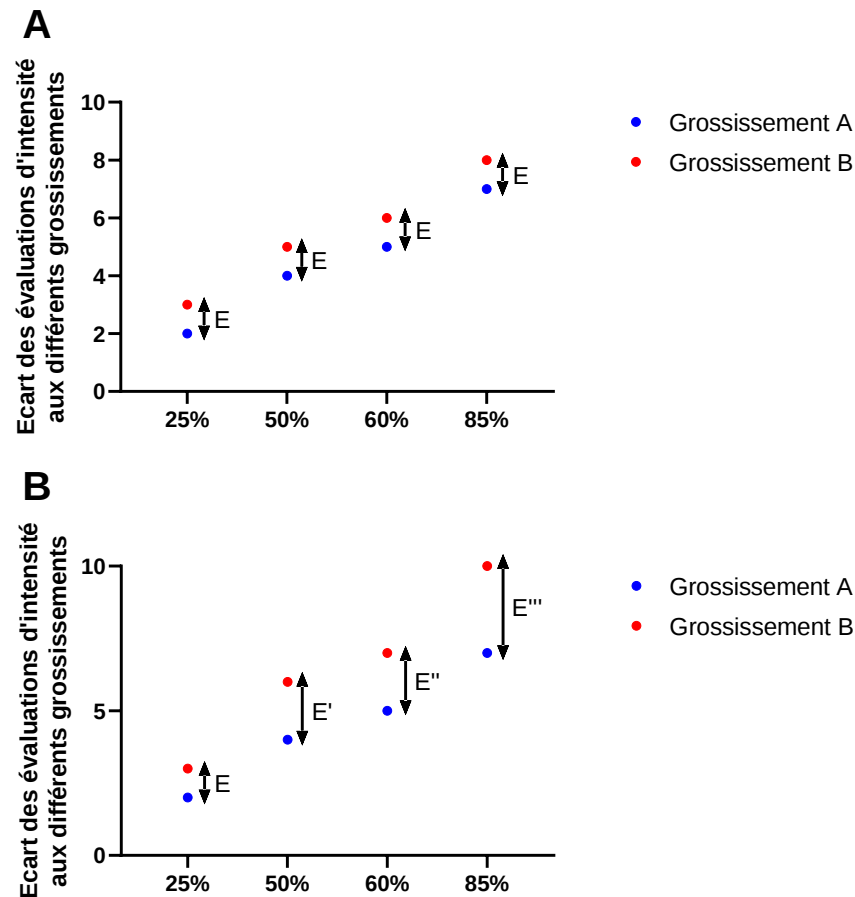


Figure 61 - Schéma explicatif de l'absence ou de la présence d'un effet de la vitesse de grossissement. Les écarts des évaluations des intensités estimées par les participants entre deux grossissements différents sont indiqués à l'aide de flèches noires. Les écarts sont identiques pour les différents pourcentages d'intensité électrique et reflètent l'absence d'effet de la vitesse **(A)**. Les écarts sont différents pour les différents pourcentages d'intensité électrique et reflètent la présence d'effet de la vitesse **(B)**.

Pour cela, nous avons donc fait une analyse de la variance à mesures répétées à deux facteurs en prenant les écarts des évaluations des intensités entre le grossissement de la sphère de référence et le grossissement inférieur (ou supérieur) de la sphère. Le premier facteur était l'« écart entre sphère : grossissement de référence versus grossissement inférieur (ou supérieur) » et le second était « point de vue : 1PP versus 3PP ». Aucune différence significative n'a été identifiée pour le facteur « écart entre sphère : grossissement de référence versus grossissement inférieur » pour les participants OBE (**Figure 63A**) et NON OBE (**Figure 63C**). De même, aucune différence n'est apparue pour le facteur « écart entre sphère : grossissement de référence versus grossissement supérieur » pour les participants OBE (**Figure 63B**) et les NON OBE (**Figure 63D**).

La vitesse de grossissement ne semble donc pas influencer l'estimation de l'intensité électrique ressentie.

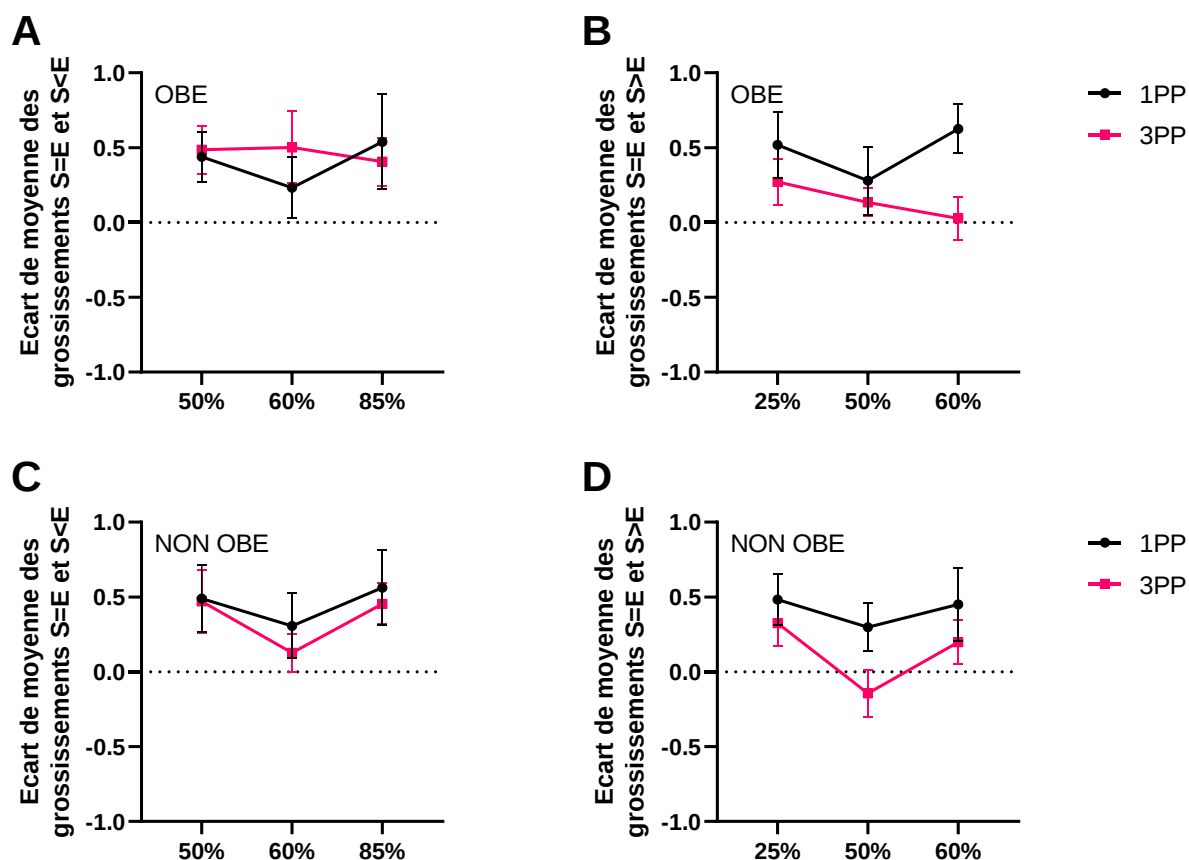


Figure 62 – Comparaison des écarts de moyenne des différents grossissements en fonction du pourcentage d'intensité électrique délivrée et le point de vue des participants. La vitesse de grossissement n'a eu aucun impact sur les évaluations de l'intensité électrique pour les participants OBE (A et C) et les participants NON OBE (B et D). OBE : participants ayant eu l'impression de sortir de leur corps ; NON OBE : participants n'ayant pas eu l'impression de sortir de leur corps ; 1PP : point de vue à la première personne ; 3PP : point de vue à la troisième personne.

5.3.3.4. Influence du point de vue

Nous avons montré que le point de vue avait un impact sur les seuils douloureux et nous voulions déterminer si cet effet pouvait se retrouver également pour l'évaluation des intensités électriques évoquées. Nous avons alors comparé les estimations des intensités sur l'échelle numérique dans les conditions du point de vue à la première personne et du point de vue à la troisième personne pour les participants OBE et NON OBE à l'aide d'une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs. Nos analyses ne montrent aucune différence significative entre les conditions d'absence et de présence d'une représentation visuelle, ni entre les différents grossissements, ni concernant la vitesse de grossissement.

Le point de vue ne semble donc pas influencer l'évaluation des intensités électriques délivrées aux participants.

5.3.5. Corrélations entre les niveaux de suggestibilité, les niveaux d'incarnation et les niveaux de sortie de corps

Nous avons voulu déterminer s'il existait des liens entre les différents scores de suggestibilité, d'incarnation et de sortie de corps. Pour cela, nous avons calculé les corrélations non paramétriques de Spearman de ces trois variables. La carte de chaleur de la matrice de corrélation est illustrée sur la **Figure 64**.

Aucune corrélation n'a été trouvée entre les différents scores d'incarnation, de suggestibilité et de sortie de corps des participants.

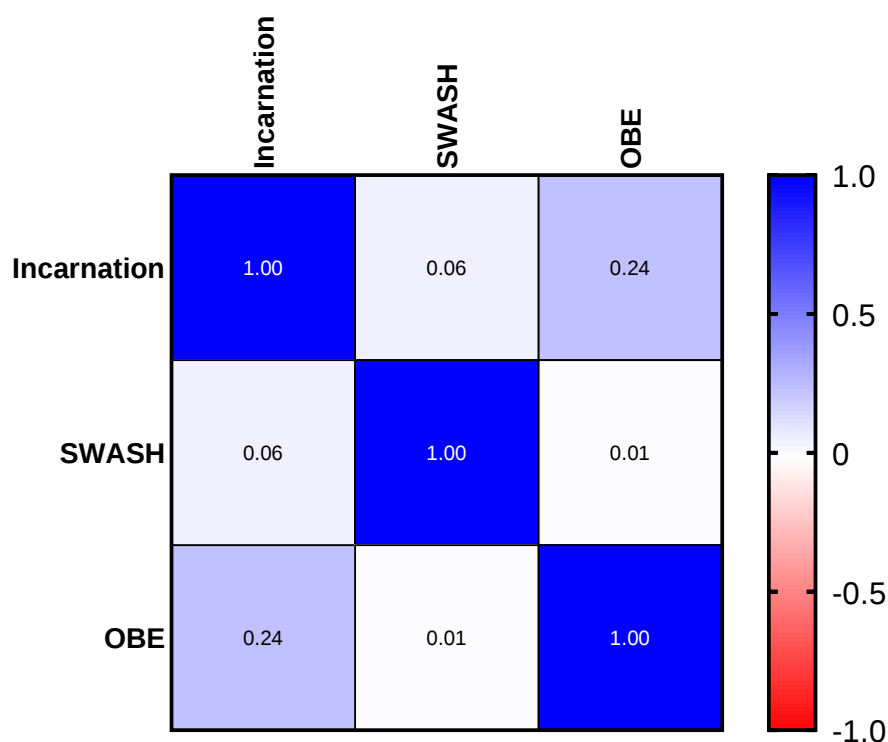


Figure 63 – Carte de chaleur de la matrice de corrélation entre les niveaux d'incarnation, les niveaux de suggestibilité (SWASH) et les niveaux de sortie de corps.

Les scores d'incarnation, de suggestibilité et de sortie de corps des participants ne sont donc pas corrélés entre eux.

5.5. Discussion

5.5.1. Effets de la représentation visuelle sur l'incarnation, les seuils douloureux et les évaluations d'intensité des stimulations tactiles

Nos résultats montrent que la présence d'une représentation visuelle grossissante ne modifie pas les niveaux d'incarnation par rapport à une absence de représentation visuelle. En effet, les niveaux d'agentivité, de localisation de soi, de possession corporelle et d'apparence extérieure n'étaient significativement pas différents avec ou sans représentation visuelle. Leurs moyennes sont cependant toutes supérieures en présence de la représentation visuelle. De plus, et contrairement aux données de la littérature [185], les niveaux de possession corporelle n'étaient significativement pas supérieurs en présence d'une stimulation visuotactile (représentation visuelle).

Dans les études précédentes, nous avons émis les hypothèses que l'absence d'effet de la représentation visuelle sur l'incarnation pouvait s'expliquer 1) par une absence de grossissement cohérent de la sphère par rapport à l'intensité électrique et 2) par une prédominance de la stimulation visuomotrice. Nos résultats permettent d'éliminer la première hypothèse. Ainsi, et comme l'avaient proposé Kokkinara et Slater et Tsakaris [128], [206], l'absence de différence significative s'expliquerait probablement par un effet négligeable de la stimulation visuotactile par rapport à une stimulation visuomotrice.

Nous avons en revanche montré que la présence d'une représentation visuelle augmente les seuils douloureux et donc induit une diminution de la douleur suggérant un effet analgésique. Cet effet a été obtenu aussi bien à l'échelle globale (points de vue à la première et à la troisième personne) qu'à l'échelle locale pour le point de vue à la troisième personne. Contrairement à nos résultats, nous pensions que la présence de la représentation visuelle induirait une augmentation de la douleur (effet algésique) comme l'ont montré Martini et al., [189]. Toutefois, une autre étude a montré qu'une caresse visuotactile sur un corps virtuel entraînait une augmentation des seuils douloureux induite par des pressions tactiles. En revanche, une caresse visuotactile sur un objet contrôle n'avait aucun effet sur les seuils douloureux des sujets [185]. Bien qu'il ne s'agisse pas de caresses dans nos conditions, la présence de représentations visuelles synchrones aux stimulations tactiles sur un corps virtuel semble confirmer également ces résultats. De plus, dans notre seconde étude, la sphère

grossissante qui apparaissait sur le mur (et donc pas sur un corps virtuel) n'a montré aucun effet sur les seuils douloureux. Deux autres hypothèses peuvent également expliquer nos résultats. La première est que la représentation visuelle a eu un effet de distraction chez les participants et a détourné leur attention de la douleur. Plusieurs études ont, en effet, confirmé que la distraction permettait une diminution de la douleur en réalité virtuelle [160], [209]–[211] ou hors réalité virtuelle [212], [213] et que la distraction était plus efficace sur des stimuli douloureux de faibles intensités [214] comme c'était le cas pour notre expérimentation. La seconde hypothèse viendrait du fait que l'observation d'une représentation visuelle sur le bras virtuel d'une vue à la troisième personne a eu un impact direct sur les seuils douloureux. En effet, un conflit entre le retour visuel (la représentation visuelle) et le retour tactile (la stimulation électrique) a pu entraîner une réduction de la douleur. Dans leur étude, Gallace et al., ont perturbé les processus de localisation de la douleur en croisant les bras des participants et les résultats ont montré une diminution des intensités douloureuses thermiques et électriques [215]. Les auteurs ont avancé l'hypothèse que lorsqu'un conflit existe entre les entrées sensorielles, le cerveau doit réajuster les coordonnées somatosensorielles sur les coordonnées spatiales et entraîne ainsi un coût de traitement cognitif (observé dans les pics N2-P2) au détriment de l'évaluation de l'intensité des sensations induites par des stimuli douloureux ou non. Dans notre expérimentation, et après la sortie de corps, les participants étaient localisés en hauteur dans la pièce et en arrière de leur avatar (en vue à la troisième personne). Ils ressentaient donc une stimulation douloureuse sur leur bras pendant qu'ils regardaient une représentation visuelle apparaître sur le bras virtuel de leur avatar localisé devant eux. Cette configuration a pu entraîner, de manière équivalente, un conflit chez les participants. Cette hypothèse semble se confirmer étant donné qu'une diminution significative des niveaux de localisation de la douleur dans le bras et une augmentation de la douleur hors du bras en vue à la troisième personne ont été observés dans les questionnaires.

Nos résultats montrent également que 1) les participants estimaient (subjectivement) que la représentation visuelle augmentait les intensités ressenties et 2) que le grossissement modulait également l'évaluation de ces intensités. En effet, la présence d'une représentation visuelle de plus grande taille engendrait une surestimation de l'intensité ressentie alors qu'une représentation visuelle de plus petite taille entraînait une sous-évaluation de celle-ci.

Ces résultats sont en accord avec nos hypothèses et confirment l'effet du grossissement obtenu dans l'étude 2. Plusieurs études ont également montré que la taille d'un membre peut moduler la perception douloureuse [181]–[183], [216]. Par exemple, Mancini et al., ont montré que l'agrandissement visuel de la main diminuait la douleur tandis que la réduction visuelle augmentait la douleur [181]. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a étudié l'impact de la modulation de la taille d'une représentation visuelle sur les intensités estimées ou les seuils douloureux. Bien que dans notre expérimentation, la modulation de la taille ne concerne pas un membre virtuel mais une représentation visuelle, plusieurs hypothèses peuvent expliquer l'effet de grossissement obtenu. Dans leur étude, Fusaro et al., ont demandé à des participants d'évaluer les intensités ressenties suite à des stimulations tactiles appliquées sur leur main virtuelle (sans stimulation réelle) : une caresse, un touché avec une balle ou la pénétration d'une aiguille. L'intensité estimée des stimuli étaient plus importante pour l'aiguille, intermédiaire pour la caresse et minimale pour le toucher de balle [196]. En d'autres termes, un simple stimulus visuel perçu comme un danger potentiel pour le corps augmente l'intensité douloureuse. Dans notre étude, il est possible que les participants aient perçu la représentation visuelle comme un danger potentiel étant donné qu'elle apparaissait de manière synchrone à l'intensité électrique. Les résultats des questionnaires ont d'ailleurs confirmé cela étant donné que les participants estimaient qu'il y avait un rapport entre la représentation visuelle et la douleur. La présence de ce danger potentiel (la représentation visuelle) a donc entraîné une estimation supérieure de l'évaluation de l'intensité. En partant de cette hypothèse, les différents grossissements de la représentation visuelle ont pu être interprétés comme des dangers plus ou moins importants qui ont eux-mêmes conduit à une estimation plus ou moins importante de l'évaluation de l'intensité.

5.5.2. Effets des différents points de vue sur l'incarnation, les seuils douloureux et les évaluations d'intensité des stimulations tactiles

Nos résultats indiquent que les niveaux d'agentivité, de possession corporelle, de localisation de soi et d'incarnation étaient élevés du point de vue de la première personne et significativement plus faibles à la troisième personne. Ces résultats sont en accord avec nos hypothèses. En effet, plusieurs études ont montré que la possession corporelle est généralement plus forte en vue à la première personne (1PP) [133], [143], [217]–[219] ainsi que la localisation de soi [119], [120], [217]. La diminution significative des niveaux d'agentivité s'expliquerait probablement, quant à elle, par le fait que les participants n'avaient plus le contrôle moteur de leurs membres supérieurs lorsque le point de vue était à la troisième personne.

La vue à la troisième personne a également diminué de manière significative la douleur. Ces résultats sont également en accord avec nos hypothèses et sont en accord avec d'autres études montrant que voir un corps virtuel auquel on s'identifie, diminue la perception douloureuse [185]–[187]. Cela peut également s'expliquer par le fait que regarder son propre corps (mais pas un objet ou le corps d'une autre personne), tout en recevant un stimulus douloureux, produit des effets analgésiques [178], [179].

Tous les participants, qu'ils se soient appropriés ou non le corps virtuel et qui ont eu l'impression ou non de sortir de leur corps (respectivement OBE et NON OBE), ont très largement estimé que leur douleur était localisée dans leur bras lorsqu'ils étaient en vue à la première personne. Toutefois, à la troisième personne, et pour les participants OBE, l'estimation de la localisation de la douleur dans le bras était significativement plus faible et la localisation de la douleur hors du bras était significativement plus haute (en comparaison avec le point de vue à la première personne). Ces résultats pourraient s'expliquer par deux raisons différentes. La première viendrait de l'apparition d'un conflit entre la douleur ressentie dans leur bras et le fait de voir la représentation visuelle apparaître sur le bras de leur avatar localisé devant eux. Ce conflit aurait ainsi entraîné une perturbation des processus de la localisation de la douleur comme dans l'étude de Gallace [215]. La seconde explication pourrait provenir d'un problème d'interprétation de la question par les participants. En effet,

les questions « J'ai eu l'impression que la douleur était dans mon bras » et « J'ai eu l'impression que la douleur était hors de mon bras » ne faisaient pas référence au type de bras dont il s'agissait (bras réel ou bras virtuel). Pour certains, la localisation de la douleur dans (ou hors) du bras a ainsi pu faire référence au bras réel alors que pour d'autres, elle faisait référence au bras virtuel. Cette différence d'interprétation pourrait donc expliquer en partie les différences d'estimation. Cependant, et de manière étonnante, ces résultats ont également été révélés chez les participants NON OBE et ce, de manière plus importante encore. Une différence significative a d'ailleurs été trouvée entre les participants OBE et NON OBE en vue à la troisième personne. En partant du principe qu'il s'agisse d'une erreur d'interprétation de la question, les participants NON OBE auraient dû estimer la localisation de la douleur dans leur bras de manière équivalente entre les conditions à la première et à la troisième personne étant donné qu'ils ne s'étaient pas appropriés le bras virtuel de l'avatar. A l'inverse, les estimations de la douleur hors du bras auraient dû être moins élevées en vue à la troisième personne. Ces résultats tendraient donc à dire qu'il ne s'agissait pas d'une mauvaise interprétation de la question. L'explication la plus plausible est que le conflit de localisation a été plus important pour les participants NON OBE que pour les participants OBE et ce, même s'ils ne se sont pas appropriés le corps virtuel et n'ont pas eu l'impression de sortir de leur corps.

Les participants OBE ont également associé de manière équivalente la représentation visuelle à la douleur dans les vues à la première et à la troisième personne. Toutefois, chez les participants NON OBE, la sphère était significativement moins associée à la douleur en vue à la troisième personne alors qu'elle était associée de manière identique aux participants OBE en vue à la première personne. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que la représentation visuelle qui apparaissait sur le bras de l'avatar ne correspondait pas à leur douleur étant donné que les participants NON OBE ne s'étaient pas appropriés leur avatar à la troisième personne.

Les participants OBE et NON OBE ont également estimé que la représentation visuelle était autant une cause qu'une conséquence de la douleur ou au contraire, n'était ni une cause, ni une conséquence de la douleur. Les évaluations moyennes obtenues étaient en effet intermédiaires (environ 3 sur 6). Cette absence de différence ainsi que les niveaux moyens obtenus de ces estimations peuvent s'expliquer par l'indécision des participants à apporter

une réponse à cette question. En effet, le questionnaire plaçait par défaut le curseur au milieu de l'échelle à 3 sur 6 et les participants devaient donner une réponse pour passer à la question suivante. Lorsque les participants ne savaient pas (ou ne souhaitaient) pas répondre à la question, ils répondaient par des valeurs moyennes à l'endroit où le curseur était positionné.

Enfin, et contrairement à nos hypothèses, nos résultats ne permettent pas de montrer que le point de vue influence l'évaluation de l'intensité électrique des stimulations délivrées aux participants contrairement aux seuils douloureux. Ces résultats pourraient s'expliquer par le fait qu'il y a eu une surévaluation de l'influence de la stimulation électrique et une sous-évaluation de l'influence de la sphère en vue à la troisième personne pour les participants NON OBE. Toutefois, cette hypothèse ne s'est pas confirmée pour les participants OBE étant donné qu'ils ont été autant influencés par la sphère et la stimulation électrique en vue à la première personne qu'en vue à la troisième personne. Une autre possibilité aurait pu être la distance virtuelle entre les yeux des participants et la représentation visuelle sur le bras de l'avatar devant les sujets. En effet, la distance était plus importante lorsqu'ils étaient à la troisième personne plutôt qu'à la première personne et la sphère apparaissait ainsi plus petite et donc possiblement moins influente. Cette hypothèse semble toutefois peu probable étant donné qu'elle ne permet pas d'expliquer pourquoi la présence et le grossissement de la sphère ont eu un impact sur l'évaluation de l'intensité des stimulations.

5.5.3. Expérience de sortie de corps

Seulement 42,86 % des participants ont eu l'impression de sortir de leur corps. Ce faible pourcentage peut s'expliquer par de multiples raisons. La première pourrait venir du fait que tous les participants ne se sont pas appropriés le corps virtuel (à cause de l'apparence extérieure de l'avatar ou d'une faible agentivité par exemple). Une seconde raison pourrait venir d'une application des stimulations visuotactiles moins efficace que celle réalisée dans d'autres études. En effet, la durée de nos stimulations dépendait des niveaux de seuils douloureux identifiés par les participants. Cette durée était inférieure à celle utilisée pour induire l'illusion de la main en caoutchouc (environ 10 minutes chez Botvinick et Cohen [112]). Par ailleurs, d'autres études utilisent une stimulation unique, d'intensité équivalente et non douloureuse pour induire l'illusion [120], [134], [143]. Dans notre expérimentation, la stimulation visuotactile variait en fonction de l'intensité électrique délivrée, la taille de la représentation visuelle et engendrait à terme une sensation douloureuse chez les

participants. Notre protocole expérimental a donc rendu problématique toute comparaison avec d'autres études. De plus, il est important de nuancer le faible pourcentage de sortie de corps obtenu dans notre étude étant donné que les travaux existants ont montré que seulement 70% des sujets étaient capables de ressentir l'illusion de la main en caoutchouc de manière fiable [113], [197]. Enfin, il est également important de préciser que dans la plupart des études sur les sorties de corps, le point de vue était soit à la première personne [119], soit à la troisième personne [120], [217], [220] et une seule étude, à notre connaissance, a fait passer les participants d'une vue à la première personne à une vue à la troisième personne à l'aide d'un effet virtuel de caméra [134]. Étant donné que notre étude était similaire à ce dernier cas, il est possible que malgré toutes nos précautions, les participants n'aient pas eu le sentiment de sortir réellement de leur corps à cause d'un mouvement de caméra trop rapide ou d'un effet trop peu réaliste. Toutefois, il est intéressant de noter que la plupart des participants ont indiqué oralement à la fin de l'expérimentation avoir ressenti un « effet étrange » durant la sortie de corps mais que cet effet s'est estompé avec le temps lorsque la position de la caméra s'est fixée.

Dans notre étude, nous avons également décidé d'utiliser des suggestions hypnotiques afin d'optimiser la sortie de corps. Plusieurs études ont, en effet, rapporté que des sorties de corps étaient possibles seulement à l'aide de suggestions hypnotiques [207], [221], [222]. Nous estimions donc que l'ajout de ces suggestions renforceraient l'illusion de sortie de corps en plus des autres paramètres (effet de caméra, effets de vections auditive et visuelle et stimulations visuotactiles). Les résultats n'ont cependant montré aucune corrélation entre les niveaux d'incarnation, de sortie de corps et de niveau de suggestibilité. Nous avons émis l'hypothèse que les participants avec un score élevé de sortie de corps auraient également des niveaux élevés de niveau de suggestibilité hypnotique. L'absence de corrélations entre ces deux variables pourrait s'expliquer par la mise en place de deux mécanismes neuronaux différents. En effet, la majeure partie des études mettent en évidence le rôle actif des intégrations multisensorielle et sensorimotrice impliquées dans les mécanismes de localisation de soi avec notamment l'implication de la jonction temporo-pariétale droite (rTPJ) [223]. Toutefois, une autre étude a montré que lorsqu'une sortie de corps est simulée à l'aide de suggestions hypnotiques, la jonction temporo-pariétale (rTPJ) était bien impliquée mais que d'autres régions (temporo-occipitales, frontales et médianes) l'étaient aussi [224, p.].

DISCUSSION GÉNÉRALE

6. Discussion générale

6.1. Résumé des résultats

L'objectif de ce projet doctoral était d'étudier l'impact d'une représentation visuelle sur la modulation de la douleur et les niveaux d'incarnation. Pour cela, nous avons mis en place trois études différentes permettant de connaître les effets d'une représentation visuelle présente ou absente ; synchrone ou asynchrone (à une stimulation électrique) ; grossissante ou non ; localisée dans le corps ou hors du corps et enfin, lorsque le participant était dans ou hors de son corps.

D'une manière générale, nos résultats ont montré que les niveaux d'incarnation étaient élevés dans l'ensemble des conditions expérimentales où le point de vue des participants était à la première personne. Les composantes de l'incarnation tels que l'agentivité, la possession corporelle et la localisation de soi étaient identiquement élevés pour ce même point de vue. Toutefois, la sortie de corps a entraîné une forte diminution de l'incarnation et de ces différentes composantes. De même, le fait de regarder son bras plutôt que le mur a entraîné une augmentation de la composante « localisation de soi » bien que ce résultat n'ait pas été confirmé dans la seconde étude.

L'ajout d'une représentation visuelle n'a d'ailleurs pas eu d'impact sur ces niveaux d'incarnation à la fois lorsqu'elle apparaissait sur le bras et sur le mur. Toutefois, et de manière étonnante, le grossissement de la représentation visuelle a entraîné une augmentation de l'agentivité lorsqu'elle apparaissait sur le mur.

Cependant, et concernant les seuils douloureux, la représentation visuelle grossissante a eu un effet analgésique par rapport à une absence de représentation visuelle dans l'étude 3 (contrairement à la présence non grossissante d'une représentation visuelle dans l'étude 1). Cet effet était d'ailleurs principalement visible lorsque les participants étaient hors de leur corps. De même, la vitesse de grossissement a eu un impact sur les seuils douloureux étant donné que plus la représentation visuelle grossissait, plus la douleur était importante. En outre, la sortie de corps a également entraîné une diminution de la douleur des participants.

L'effet lié au grossissement de la représentation visuelle a également été confirmé pour l'estimation de l'intensité des stimulations tactiles non douloureuses. En effet, un

grossissement plus important entraînait une augmentation des estimations d'intensité alors, qu'à l'inverse, un grossissement plus faible entraînait une diminution de ces estimations.

En plus d'évaluer l'impact d'une représentation visuelle sur les seuils douloureux et les estimations d'intensité des stimulations tactiles, il était également intéressant de s'intéresser à l'impression subjective qu'avaient les participants pour celle-ci.

Ainsi, les résultats ont montré que l'association de la douleur à la représentation visuelle était plus élevée dans les conditions synchrones qu'asynchrones. De même, plus le grossissement était important et plus l'association à la douleur l'était aussi. En outre, le point de vue à la première ou à la troisième personne n'a eu aucune incidence sur l'association de la représentation à la douleur pour les participants qui ont eu l'impression de sortir de leur corps (OBE) mais pas pour les participants qui n'ont pas eu l'impression de sortir de leur corps (NON OBE). En effet, pour ces derniers, l'association était plus élevée en vue à la première personne qu'en vue à la troisième personne.

Les évaluations subjectives de la localisation de la douleur dans ou hors du bras ont, quant à elles, également montré que la représentation visuelle entraînait un conflit multisensoriel. En effet, les participants ont estimé de manière plus importante que la douleur était hors de leur bras lorsque la représentation visuelle grossissait sur le mur. De même, lorsque les participants étaient hors de leur corps, la localisation de la douleur dans le bras diminuait et la localisation de la douleur hors du bras augmentait.

Il est aussi intéressant de remarquer que les analyses de l'influence du sexe (non présentées dans nos résultats) n'ont révélé aucune différence significative des seuils douloureux ou de l'incarnation dans aucune des trois études.

6.2. Limites du projet doctoral

Les différentes études effectuées dans le cadre de ce projet doctoral possèdent plusieurs limites technologiques et scientifiques.

Premièrement, les simulations en réalité virtuelle ne peuvent évidemment pas remplacer des conditions réelles. Bien que plusieurs études aient montré que la réalité virtuelle permettait d'obtenir des conditions écologiques [100], les environnements virtuels 3D ne sont malheureusement pas, aujourd'hui, encore assez fidèles à la réalité pour que les participants aient l'impression d'être dans des conditions réelles. De même, les niveaux faibles d'apparence extérieure ont bel et bien confirmé que les participants n'avaient pas la sensation visuelle que leur corps virtuel ressemblait à leur corps réel et ce, bien que les niveaux d'incarnation globaux soient élevés. Il est donc possible que ce manque de réalisme ait interféré avec les résultats obtenus. Plusieurs possibilités auraient été envisageables pour pallier ce manque de réalisme. Le premier est l'utilisation de la réalité augmentée plutôt que la réalité virtuelle. En effet, les participants n'auraient plus eu besoin de s'incarner efficacement dans leur avatar pour évaluer l'impact d'une représentation visuelle sur la douleur. Toutefois, nous souhaitons également étudier l'impact de la représentation visuelle sur l'incarnation et seule la réalité virtuelle le permettait. En outre, la simulation de sortie de corps n'aurait pas été possible en utilisant la réalité augmentée. La seconde possibilité aurait été de créer un environnement virtuel et un avatar sur-mesure à l'aide de la photogrammétrie. Dans ces conditions, l'environnement virtuel et le corps de l'avatar auraient parfaitement été identiques à la réalité. Cependant pour des raisons techniques et temporelles, nous n'avons pas pu mettre en place ce procédé. De plus, l'avatar aurait été figé dans une position imposée et un manque de naturel serait apparu. Il est également possible que le concept de « vallée dérangeante » (« uncanny valley » en anglais) se serait alors appliqué (initialement développée dans le domaine de la robotique, cette théorie stipule qu'un malaise, voire une répulsion, apparaît lorsqu'on s'approche, sans l'atteindre, d'une apparence réaliste) [225].

Le suivi des mouvements des participants était également limité au positionnement d'un seul capteur de mouvements par main. Une cinématique inverse a été mise en place afin de calculer les positions théoriques du bras par rapport aux positions des mains. Cette technique engendrait toutefois quelques variations de positions entre les mouvements réels du participant et les mouvements des bras virtuels. Une possibilité pour pallier ce problème

aurait été d'utiliser plusieurs capteurs de mouvements sur l'ensemble des articulations afin d'obtenir un suivi complet du bras. Le port d'un tel équipement par les participants aurait cependant été contraignant. En outre, le suivi des mouvements des doigts n'a également pas été mis en place dans nos conditions expérimentales par manque de temps. Quelques mois après le début des expérimentations, de nouveaux casques de réalité virtuelle sont arrivés sur le marché et intégraient directement un suivi des doigts et des mains. Bien qu'intéressants et performants, aucun d'eux ne permettaient un suivi des membres supérieurs dans leur totalité puisque seuls les doigts et les mains sont virtuellement représentées et les mouvements suivis. Il aurait donc été nécessaire d'ajouter un corps virtuel complet et de le superposer aux mains virtuelles du casque avant d'ajouter une cinématique inverse. Le manque de temps et l'incertitude des résultats ainsi obtenus nous ont amenés à ne pas mettre en place ce nouveau procédé. Nous estimons donc que notre configuration expérimentale, bien que limitée, a été un bon compromis vis-à-vis des technologies du moment et n'a pas empêché d'obtenir de bons niveaux d'incarnation.

L'utilisation imposée d'une représentation visuelle (sphère rouge) pour les participants peut également être considéré comme une limite. Il est en effet probable que l'association de la douleur à la représentation visuelle aurait été meilleure si cette dernière avait été créée sur mesure par les participants. Plusieurs raisons ont toutefois expliqué l'utilisation imposée de cette représentation visuelle. La première venait du fait que nous souhaitions éviter l'ajout de biais étant donné que la littérature montrait notamment que la couleur avait un impact sur la douleur elle-même [95], [189]. Nous avons donc choisi la couleur la plus associée à la douleur d'après la littérature scientifique [85], [86]. En outre, étant donné que nous souhaitions étudier l'impact du grossissement d'une représentation visuelle, il était impératif que la forme soit identique pour chaque participant.

Concernant les stimulations douloureuses, de nombreuses possibilités s'offraient à nous. Les études utilisent en effet différents stimuli douloureux tels que les pressions mécaniques [226], [227], les stimulations thermiques [228], [229] ou électriques [95], [215], [230], [231], la capsaïcine [232], [233] ou encore la douleur ischémique [234], [235]. Nous devions toutefois choisir une méthode de stimulation douloureuse qui permette d'obtenir différentes intensités, d'obtenir une bonne précision et d'obtenir des impulsions courtes. Seules les

stimulations électriques et thermiques à l'aide d'une thermode étaient donc possibles. Nous avons opté *in fine* pour les stimulations électriques.

Plusieurs de nos résultats ont montré des tendances sans véritablement obtenir de significativité à cause de la variabilité des données. Nous avons pallié ce problème en augmentant le nombre de sujets après la première étude. Toutefois, une augmentation encore plus importante de sujets aurait été nécessaire afin d'obtenir des différences plus importantes.

Enfin, nous avons également essayé de mettre en place un électroencéphalogramme (EEG) afin de mesurer les potentiels évoqués et ainsi obtenir des données neurophysiologiques. Toutefois, pour des raisons techniques, nous n'avons pas pu l'intégrer dans nos expérimentations. En effet, après plusieurs mois d'essais, plusieurs problèmes ont été rencontrés. D'une part, la puissance de calcul de l'ordinateur n'était pas suffisante pour soutenir à la fois le casque de réalité virtuelle et l'enregistrement des EEG. Nous avons également essayé, d'autre part, de relier deux ordinateurs en parallèle afin que chacun d'eux puisse gérer un logiciel (un premier pour gérer le logiciel Unity qui se charge du rendu et des interactions de l'environnement virtuel 3D et un second pour la récupération des signaux EEG). La communication entre le logiciel d'enregistrement des EEG et le casque de réalité virtuelle afin d'envoyer les déclencheurs (triggers) a toutefois échoué. En outre, l'encombrement du casque rendait difficile l'ajout de l'EEG et la durée de l'expérimentation aurait été trop longue. Pour toutes ces raisons, et pour les contraintes temporelles du projet doctorat, nous avons décidé de nous concentrer sur les données comportementales.

6.3. Perspectives du projet

L'étude de l'impact d'une représentation visuelle sur la douleur n'en est qu'à ses balbutiements. De très nombreux autres protocoles sont nécessaires afin d'avoir une vision plus complète de ces impacts. La forme, la personnalisation et le contrôle de la représentation visuelle par les sujets eux-mêmes pourraient être des pistes intéressantes de recherche. De même, l'utilisation d'un discours hypnotique pourrait également renforcer les effets d'association de la représentation visuelle à la douleur.

Enfin, il serait intéressant d'étudier l'impact de ce procédé sur des patients douloureux chroniques afin d'en étudier les performances. Il serait ainsi possible d'évaluer la différence d'intensité et la durée d'efficacité après l'arrêt de l'exposition à l'environnement virtuel. L'effet de l'âge (enfants versus adultes par exemple) pourrait également être un point de recherche intéressant.

CONCLUSION

Conclusion générale

Pour conclure, rappelez-vous rapidement de l'histoire initiale. Vous vous étiez cognié le petit orteil et une sphère était apparue. Vous vous étiez alors rendu compte qu'en jouant avec cette sphère, vous pouviez moduler votre douleur...

Ce qui ne semblait être qu'une simple histoire sortie d'un roman au début s'est finalement révélée être exacte grâce à ce projet doctoral. D'après nos recherches, il semble qu'il soit effectivement possible de moduler vos perceptions douloureuses en utilisant une simple représentation visuelle de votre douleur !

Par ailleurs, et bien que vous l'ignoriez peut-être au début de cette histoire, une autre possibilité s'offrait à vous. Vous auriez, en effet, pu laisser la sphère sur votre orteil et décider de sortir de votre corps. Vous vous seriez alors rendu compte que la sphère et la douleur étaient toujours présentes sur le corps localisé devant vous mais que vous la ressentiez plus faiblement. Vous auriez ainsi pu aller chercher de l'eau et vous recoucher sans réveiller votre partenaire pendant que votre corps, lui, continuait de souffrir de son côté...

ANNEXES

Annexe 1 : Discours de suggestibilités

Partie 1 : Renforcement de l'incarnation

Dans quelques instants, vous allez entrer dans un environnement virtuel et vous incarner dans un avatar... Cet avatar représente votre corps dans ce monde virtuel. Il peut être un peu différent de votre corps réel... mais afin de vivre totalement cette expérience, vous allez faire comme si ce corps virtuel était le vôtre... comme si finalement vous vous mettiez dans la peau de ce corps le temps de l'expérimentation...

Lancement de la vidéo d'incarnation

Vous seriez peut-être curieux de percevoir ces sensations qui vous font réaliser déjà que ce corps virtuel est le vôtre... Vous vous connectez de plus en plus à lui...

Alors que vous constatez que vous êtes capable de décider de faire bouger ces bras, ces mains... Vous réalisez que vous incarnez maintenant et totalement ce corps virtuel le temps de l'expérience.

Partie 2 : Renforcement de la sortie de corps

Pour la suite de cette expérience... vous allez commencer... à juste prendre un petit moment pour faire une pause et vous détendre. Parfois la détente peut s'approfondir Juste en prenant une bonne inspiration et expirer profondément. Et peut-être qu'à la suite de cette profonde expiration.... Vous pouvez réaliser que votre respiration est devenue plus lente et plus profonde, ou plus profonde que lente.

Se sentir plus détendu peut aussi nous amener à prendre plus de recul sur notre environnement.

Alors que vous écoutez cette voix... vous pouvez prêter attention à ce que vous voyez... comme par exemple ce ventilateur sur votre gauche...et alors que vous portez votre attention sur sa couleur, ses détails, vous pouvez entendre le son qu'il émet... également sur votre gauche.

Et cette table devant vous... avec cette couleur particulière... et ce poste de radio posé à votre droite.... Et alors que vous observez les détails de ce poste de radio... vous allez dans quelques secondes entendre une musique en sortir... une musique que nous avons choisie pour qu'elle vous apaise... encore plus... cette musique qu'il suffit d'écouter pour vivre une expérience

particulière... une expérience où vous allez... finalement faire comme si... vous sortiez de ce corps... comme pour l'observer d'un autre point de vue. Une expérience que l'on peut vivre parfois... lorsque l'on se souvient d'un souvenir ... ou lorsque l'on se projette dans le futur... et que l'on se voit... La seule différence aujourd'hui est que vous allez faire cette expérience les yeux ouverts....

Alors je vais compter jusqu'à 3 et lorsque je prononcerai le chiffre 3, vous serez plongé dans le noir juste quelques secondes, ce qui vous donnera le signal que l'expérience de sortie de votre corps va commencer. 1...alors que vous regardez devant vous... vous entendez toujours cette musique sur votre droite alors que sur votre gauche, vous entendez le bruit de ce ventilateur... 2...vous êtes toujours détendu et vous regardez droit devant vous, le corps totalement immobile. 3...

Vous commencez à vous éloigner de ce corps, comme un train peut s'éloigner d'un quai... le son de ce ventilateur à gauche s'éloigne également... tout comme le volume de cette musique sur votre droite....

C'est intéressant de réaliser que l'on peut être là... et en même temps ailleurs... Alors vous pouvez peut-être apprécier cette posture d'observation... vous seriez peut-être intéressé... de savoir si vous pouvez ressentir différemment... les sensations induites par des stimulations déclenchées sur ce corps devant vous.

Partie 3 : Renforcement de la réassociation à son corps virtuel

Alors que vous avez pu apprécier cette expérience de vous voir de l'extérieur, vous aller dans quelques instants réintégrer entièrement votre corps. Vous allez ainsi progressivement vous rapprocher de votre corps virtuel jusqu'à l'intégrer entièrement, totalement... Lorsque l'écran noir disparaîtra, alors vous pourrez voir de votre point de vue habituel et bouger vos mains pour réaliser que vous êtes intégralement associé avec vous-même. Votre tête dans votre tête, vos mains dans vos mains et vos pieds dans vos pieds...

Annexe 2 : Questionnaire de suggestibilité

0- Induction hypnotique

Nous avons commencé la session par une induction vous invitant à entrer dans un état d'hypnotique.

Rapport subjectif

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous eu l'impression d'entrer dans un état hypnotique. '0' signifie que votre état de conscience était tout à fait normal, '1' signifie que vous étiez légèrement hypnotisé et '5' signifie que vous étiez dans un état hypnotique très profond.

	0	1	2	3	4	5	
Etat normal	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Etat hypnotique profond

1- Abaissement de la main droite

Nous vous avons demandé d'étendre votre bras droit devant vous et de ressentir de la lourdeur, comme si un poids le forçait à descendre.

Rapport objectif

Estimeriez-vous qu'un observateur extérieur aurait vu votre main s'abaisser d'au moins 15 centimètres ?

- ☐ Ma main s'est abaissée de plus de 15 centimètres
- ☐ Ma main s'est abaissée de moins de 15 centimètres

Rapport subjectif

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous senti que votre main devenez lourde. '0' signifie que vous avez senti votre main n'était pas plus lourde que d'habitude. '5' signifie que vous avez senti votre main lourde comme s'il y avait réellement un objet lourd qui la tirait vers le bas.

	0	1	2	3	4	5	
Poids normal	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Très lourd

2- Mains qui se rapprochent

Nous vous avons demandé de positionner vos mains devant vous, à environ 30 centimètres de distance et d'imaginer une force qui les attirent.

Rapport objectif

Estimeriez-vous qu'un observateur extérieur aurait vu vos mains s'approcher d'au moins 15 centimètres ?

- ☐ Mes mains se sont approchées de plus de 15 centimètres
- ☐ Mes mains se sont approchées de moins de 15 centimètres

Rapport subjectif

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous senti une force entre vos mains. '0' signifie que vous n'avez senti aucune force. '5' signifie que vous avez senti une force comme si vos mains étaient des aimants.

	0	1	2	3	4	5	
Aucune force	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Force intense

3- Expérience de l'insecte

Nous vous avons demandé par la suite de prendre conscience d'un insecte qui volait autour de vous et qui s'est posé sur votre main. Nous vous avons demandé de le chasser.

Rapport objectif

Estimeriez-vous qu'un observateur extérieur vous aurait vu grimacer, faire un mouvement ou tout autre signe lui permettant de voir l'effet ? (En dehors de ce que vous avez pu vivre).

- ☐ J'ai eu des mimiques ou des gestes pouvant indiquer que j'expérimentais la présence d'un insecte
- ☐ Rien ne pouvait indiquer ce que je vivais à l'extérieur

Rapport subjectif

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous ressenti la présence d'un insecte, soit par le son, soit par le toucher. '0' signifie que vous n'avez rien ressenti. '5' signifie que vous avez ressenti un insecte comme s'il était vraiment présent.

	0	1	2	3	4	5	
Aucune force	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Force intense

4- Expérience du gout

Nous vous avons ensuite demandé d'imaginer un gout sucré dans la bouche et puis un gout acide.

Rapport objectif

A quel point le gout sucré était fort ?

- ☐ Je n'ai pas ressenti le gout sucré
- ☐ Le gout était vague ou faible
- ☐ Le gout était fort

Avez-vous fait une mimique qui pourrait indiquer à un observateur externe votre expérience du sucré ?

- ☐ Oui
- ☐ Non

A quel point le gout acide était fort ?

- ☐ Je n'ai pas ressenti le gout acide
- ☐ Le gout était vague ou faible
- ☐ Le gout était fort

Avez-vous fait une mimique qui pourrait indiquer à un observateur externe votre expérience de l'acide ?

- ☐ Oui
- ☐ Non

Rapport subjectif

A quel point avez-vous ressenti le gout sucré dans votre bouche ?

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous ressenti un gout sucré dans votre bouche. '0' signifie que vous n'avez pas eu de gout sucré du tout et '5' signifie que le gout sucré était très fort.

	0	1	2	3	4	5	
Pas de goût	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Goût très sucré

A quel point avez-vous ressenti le gout acide dans votre bouche ?

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous ressenti un gout acide dans votre bouche. '0' signifie que vous n'avez pas eu de gout acide du tout et '5' signifie que le gout acide était très fort.

	0	1	2	3	4	5	
Pas de goût	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Goût très sucré

5- Rigidité du bras droit

Nous vous avons demandé ensuite d'étendre votre bras droit devant vous et de ressentir qu'il devenait rigide. Nous vous avons ensuite demandé de le plier.

Rapport objectif

Estimeriez-vous qu'un observateur extérieur aurait vu votre bras se plier de plus de 5 centimètres avant qu'on vous demande d'arrêter ?

- ☐ Mon bras s'est plié de moins de 5 centimètres
- ☐ Mon bras s'est plié de plus de 5 centimètres

Rapport subjectif

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous ressenti de la rigidité dans votre bras. '0' signifie que vous n'avez pas ressenti plus de rigidité que d'habitude et '5' signifie que vous ressentiez le bras complètement immobile et qu'aucune force ne pouvait le faire bouger.

	0	1	2	3	4	5	
Pas de rigidité	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Forte rigidité

6- Immobilisation de la main gauche

Nous vous avons ensuite dit que votre main gauche était très lourde et nous vous avons demandé d'essayer de la lever.

Rapport objectif

Estimeriez-vous qu'un observateur extérieur aurait vu que votre main ne s'est pas levée de plus de 2 centimètres avant que l'on vous dise d'arrêter.

- ☐ Je n'ai PAS levé ma main de plus de 2 centimètres
- ☐ J'ai levé ma main de plus de 2 centimètres

Rapport subjectif

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous ressenti de la lourdeur dans votre main. '0' signifie que vous n'avez pas ressenti plus de lourdeur que d'habitude et '5' signifie que vous ressentiez votre main comme si un objet très lourd appuyait dessus.

	0	1	2	3	4	5	
Pas de lourdeur	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Lourdeur intense

7- Expérience musicale

Nous vous avons ensuite demandé de lever la main quand vous entendez 'Joyeux anniversaire'.

Rapport objectif

☐ J'ai levé ma main

☐ Je n'ai pas levé ma main

Rapport subjectif

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous clairement entendu la musique. '0' signifie que vous n'avez pas entendu de musique et '5' signifie que vous avez entendu la musique très clairement.

	0	1	2	3	4	5	
Aucune musique	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Musique clairement entendue

8- Expérience des balles

Nous vous avons ensuite demandé de regarder une image contenant deux balles colorées. Vous avez ensuite rapporté la couleur des balles que vous avez vu à l'écran.

Rapport subjectif

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point la troisième balle était invisible. '0' signifie que vous avez clairement vu trois balles, '5' signifie que vous avez seulement vu deux balles et chaque nombre entre 1 et 4 signifie que vous avez eu quelques difficultés à discerner la troisième balle.

	0	1	2	3	4	5	
J'ai vu trois balles	☐	☐	☐	☐	☐	☐	J'ai vu deux balles

9- Amnésie

Nous vous avons dit que vous ne vous souviendrez pas de ce que vous avez vécu au cours de l'expérience d'hypnose avant que l'on vous dise « vous pouvez vous souvenir de tout ce que vous avez vécu maintenant ».

Rapport subjectif

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous eu du mal à vous souvenir des événements avant que l'on vous dise de vous souvenir de tout ? '0' signifie que vous vous souveniez clairement de tout, '5' signifie que vous avez eu tellement de mal à vous souvenir que c'était comme un trou de mémoire.

	0	1	2	3	4	5	
Je me souvenais de tout	☐	☐	☐	☐	☐	☐	J'ai eu un trou de mémoire

10- Suggestion post-hypnotique

Nous vous avons demandé enfin de faire un espace en tapant 4 fois sur la barre d'espace avant de rentrer votre réponse suite à l'amnésie.

Rapport subjectif (a)

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous ressenti le besoin de faire un espace avant votre réponse ? '0' signifie que vous n'en avez pas ressenti le besoin du tout, '5' signifie que vous avez ressenti un besoin très fort de faire un espace.

	0	1	2	3	4	5	
Je n'ai pas ressenti le besoin de faire un espace avant ma réponse	☐	☐	☐	☐	☐	☐	J'ai ressenti un besoin très clair de faire un espace avant ma réponse

Rapport subjectif (b)

Sur une échelle de 0 à 5, à quel point avez-vous vous rappelez-vous qu'on vous ait demandé de faire un espace avant votre réponse ? '0' signifie que vous vous en souveniez au moment de le faire, '5' signifie que vous n'en avez aucun souvenir au moment de le faire.

	0	1	2	3	4	5	
Je m'en souvenais au moment de le faire	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Je ne m'en souvenais pas au moment de le faire

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] L. Communication, « Bliss Solution ». <https://www.bliss-solution.com/> (consulté le déc. 04, 2021).
- [2] « Deepsen ». <http://www.deepsen.io/> (consulté le déc. 04, 2021).
- [3] « Healthy Mind - La réalité virtuelle thérapeutique ». <https://healthymind.fr/> (consulté le déc. 04, 2021).
- [4] « PainkillAR ». <https://www.painkillar.com/blog/vr-pain> (consulté le déc. 04, 2021).
- [5] A. Karenberg et C. Leitz, « Headache in Magical and Medical Papyri of Ancient Egypt », *Cephalalgia*, vol. 21, n° 9, p. 911-916, nov. 2001, doi: 10.1046/j.1468-2982.2001.00274.x.
- [6] H. Benzon, J. P. Rathmell, C. L. Wu, D. Turk, C. E. Argoff, et R. W. Hurley, *Practical Management of Pain*. Elsevier Health Sciences, 2013.
- [7] O. Dedeli et G. Kaptan, « Spirituality and Religion in Pain and Pain Management », *Health Psychol Res*, vol. 1, n° 3, p. e29, sept. 2013, doi: 10.4081/hpr.2013.e29.
- [8] H. Autorité de santé, « Douleur chronique : reconnaître le syndrome douloureux chronique, l'évaluer et orienter le patient », *Douleur analg*, vol. 22, n° 1, p. 51-68, mars 2009, doi: 10.1007/s11724-009-0119-6.
- [9] *Loi n° 2002-303 du 4 mars 2002 relative aux droits des malades et à la qualité du système de santé (1)*.
- [10] *Loi n° 2004-806 du 9 août 2004 relative à la politique de santé publique (1)*.
- [11] *Arrêté du 3 avril 2008 relatif aux missions et à la composition du comité de suivi du plan national d'amélioration de la prise en charge de la douleur 2006-2010*.
- [12] « International Association for the Study of Pain | IASP », *International Association for the Study of Pain (IASP)*. <https://www.iasp-pain.org/> (consulté le oct. 06, 2021).
- [13] « Pain terms: a list with definitions and notes on usage. Recommended by the IASP Subcommittee on Taxonomy », *Pain*, vol. 6, n° 3, p. 249, juin 1979.
- [14] S. N. Raja *et al.*, « The revised International Association for the Study of Pain definition of pain: concepts, challenges, and compromises », *Pain*, vol. 161, n° 9, p. 1976-1982, sept. 2020, doi: 10.1097/j.pain.0000000000001939.
- [15] A. Eschalier *et al.*, « Prévalence et caractéristiques de la douleur et des patients douloureux en France : résultats de l'étude épidémiologique National Health and Wellness Survey réalisée auprès de 15000 personnes adultes », *Douleurs : Evaluation - Diagnostic - Traitement*, vol. 14, n° 1, p. 4-15, févr. 2013, doi: 10.1016/j.douler.2012.11.003.
- [16] P. C. Langley, « The prevalence, correlates and treatment of pain in the European Union », *Current Medical Research and Opinion*, vol. 27, n° 2, p. 463-480, févr. 2011, doi: 10.1185/03007995.2010.542136.
- [17] « Les Français face à la douleur silencieuse ». <https://www.sanofi.fr/nos-domaines-therapeutiques/sante-grand-public/transcription-les-francais-face-a-la-douleur> (consulté le oct. 04, 2021).
- [18] J. D. Loeser, *Bonica's management of pain*, vol. 3. Lippincott Williams & Wilkins Philadelphia, 2001.
- [19] P. S. PERROT, « La douleur: définitions et concepts », *Livre blanc de la douleur 2017*, p. 31, 2017.
- [20] H. M. McCormack, D. J. de L. Horne, et S. Sheather, « Clinical applications of visual analogue scales: a critical review », *Psychological Medicine*, vol. 18, n° 4, p. 1007-1019, nov. 1988, doi: 10.1017/S0033291700009934.
- [21] M. P. Jensen, P. Karoly, et S. Braver, « The measurement of clinical pain intensity: a comparison of six methods », *Pain*, vol. 27, n° 1, p. 117-126, oct. 1986, doi: 10.1016/0304-3959(86)90228-9.

- [22] M. B. Ferraz, M. R. Quaresma, L. R. Aquino, E. Atra, P. Tugwell, et C. H. Goldsmith, « Reliability of pain scales in the assessment of literate and illiterate patients with rheumatoid arthritis », *J Rheumatol*, vol. 17, n° 8, p. 1022-1024, août 1990.
- [23] D. S. Tsze, C. L. von Baeyer, B. Bulloch, et P. S. Dayan, « Validation of Self-Report Pain Scales in Children », *Pediatrics*, vol. 132, n° 4, p. e971-e979, oct. 2013, doi: 10.1542/peds.2013-1509.
- [24] K. P. Grichnik et F. M. Ferrante, « The difference between acute and chronic pain », *Mt Sinai J Med*, vol. 58, n° 3, p. 217-220, mai 1991.
- [25] R. B. Margolis, R. C. Tait, et S. J. Krause, « A rating system for use with patient pain drawings », *Pain*, vol. 24, n° 1, p. 57-65, janv. 1986, doi: 10.1016/0304-3959(86)90026-6.
- [26] M. J. Bair, R. L. Robinson, W. Katon, et K. Kroenke, « Depression and Pain Comorbidity: A Literature Review », *Archives of Internal Medicine*, vol. 163, n° 20, p. 2433-2445, nov. 2003, doi: 10.1001/archinte.163.20.2433.
- [27] L. E. Beutler, D. Engle, M. E. Oró-Beutler, R. Daldrup, et K. Meredith, « Inability to express intense affect: A common link between depression and pain? », *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, vol. 54, n° 6, p. 752-759, 1986, doi: 10.1037/0022-006X.54.6.752.
- [28] D. A. Fishbain, R. Cutler, H. L. Rosomoff, et R. S. Rosomoff, « Chronic Pain-Associated Depression: Antecedent or Consequence of Chronic Pain? A Review », *The Clinical Journal of Pain*, vol. 13, n° 2, p. 116-137, juin 1997.
- [29] L. M. McCracken, C. Zayfert, et R. T. Gross, « The pain anxiety symptoms scale: development and validation of a scale to measure fear of pain », *Pain*, vol. 50, n° 1, p. 67-73, juill. 1992, doi: 10.1016/0304-3959(92)90113-P.
- [30] G. J. G. Asmundson et G. R. Norton, « Anxiety sensitivity in patients with physically unexplained chronic back pain: A preliminary report », *Behaviour Research and Therapy*, vol. 33, n° 7, p. 771-777, sept. 1995, doi: 10.1016/0005-7967(95)00012-M.
- [31] Z. Trost, K. Vangronsveld, S. J. Linton, P. J. Quartana, et M. J. L. Sullivan, « Cognitive dimensions of anger in chronic pain », *PAIN*, vol. 153, n° 3, p. 515-517, mars 2012, doi: 10.1016/j.pain.2011.10.023.
- [32] K. A. Greenwood, R. Thurston, M. Rumble, S. J. Waters, et F. J. Keefe, « Anger and persistent pain: current status and future directions », *PAIN*, vol. 103, n° 1, p. 1-5, mai 2003, doi: 10.1016/S0304-3959(03)00132-5.
- [33] C. J. Hale et T. Hadjistavropoulos, « Emotional Components of Pain », *Pain Research and Management*, vol. 2, n° 4, p. 217-225, 1997, doi: 10.1155/1997/283582.
- [34] C. Villemure et M. C. Bushnell, « Mood Influences Supraspinal Pain Processing Separately from Attention », *J. Neurosci.*, vol. 29, n° 3, p. 705-715, janv. 2009, doi: 10.1523/JNEUROSCI.3822-08.2009.
- [35] J. Decety et P. L. Jackson, « A Social-Neuroscience Perspective on Empathy », *Curr Dir Psychol Sci*, vol. 15, n° 2, p. 54-58, avr. 2006, doi: 10.1111/j.0963-7214.2006.00406.x.
- [36] P. L. Jackson, P. Rainville, et J. Decety, « To what extent do we share the pain of others? Insight from the neural bases of pain empathy », *PAIN*, vol. 125, n° 1, p. 5-9, nov. 2006, doi: 10.1016/j.pain.2006.09.013.
- [37] C. Villemure et C. M. Bushnell, « Cognitive modulation of pain: how do attention and emotion influence pain processing? », *PAIN*, vol. 95, n° 3, p. 195-199, févr. 2002, doi: 10.1016/S0304-3959(02)00007-6.
- [38] S. J. Bantick, R. G. Wise, A. Ploghaus, S. Clare, S. M. Smith, et I. Tracey, « Imaging how attention modulates pain in humans using functional MRI », *Brain*, vol. 125, n° 2, p. 310-319, févr. 2002, doi: 10.1093/brain/awf022.
- [39] A. Chiesa et A. Serretti, « Mindfulness-Based Interventions for Chronic Pain: A Systematic Review of the Evidence », *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, vol. 17, n° 1, p. 83-93, janv. 2011, doi: 10.1089/acm.2009.0546.
- [40] S. Banth et M. D. Ardebil, « Effectiveness of mindfulness meditation on pain and quality of life of patients with chronic low back pain », *Int J Yoga*, vol. 8, n° 2, p. 128-133, 2015, doi: 10.4103/0973-6131.158476.

- [41] R. S. Ogden, D. Moore, L. Redfern, et F. McGlone, « The effect of pain and the anticipation of pain on temporal perception: A role for attention and arousal », *Cognition and Emotion*, vol. 29, n° 5, p. 910-922, juill. 2015, doi: 10.1080/02699931.2014.954529.
- [42] C. A. Porro *et al.*, « Does Anticipation of Pain Affect Cortical Nociceptive Systems? », *J. Neurosci.*, vol. 22, n° 8, p. 3206-3214, avr. 2002, doi: 10.1523/JNEUROSCI.22-08-03206.2002.
- [43] A. Ploghaus *et al.*, « Dissociating Pain from Its Anticipation in the Human Brain », *Science*, vol. 284, n° 5422, p. 1979-1981, juin 1999, doi: 10.1126/science.284.5422.1979.
- [44] T. D. Wager, « The neural bases of placebo effects in anticipation and pain », *Seminars in Pain Medicine*, vol. 3, n° 1, p. 22-30, mars 2005, doi: 10.1016/j.spm.2005.02.003.
- [45] M. C. Bushnell, M. Čeko, et L. A. Low, « Cognitive and emotional control of pain and its disruption in chronic pain », *Nat Rev Neurosci*, vol. 14, n° 7, p. 502-511, juill. 2013, doi: 10.1038/nrn3516.
- [46] N. Sawamoto *et al.*, « Expectation of Pain Enhances Responses to Nonpainful Somatosensory Stimulation in the Anterior Cingulate Cortex and Parietal Operculum/Posterior Insula: an Event-Related Functional Magnetic Resonance Imaging Study », *J. Neurosci.*, vol. 20, n° 19, p. 7438-7445, oct. 2000, doi: 10.1523/JNEUROSCI.20-19-07438.2000.
- [47] A. M. Unruh, « Gender variations in clinical pain experience », *Pain*, vol. 65, n° 2, p. 123-167, mai 1996, doi: 10.1016/0304-3959(95)00214-6.
- [48] T. T. Dao et L. LeResche, « Gender differences in pain », *J Orophac Pain*, vol. 14, n° 3, p. 169-184; discussion 184-195, 2000.
- [49] R. B. Fillingim, C. D. King, M. C. Ribeiro-Dasilva, B. Rahim-Williams, et J. L. Riley, « Sex, Gender, and Pain: A Review of Recent Clinical and Experimental Findings », *The Journal of Pain*, vol. 10, n° 5, p. 447-485, mai 2009, doi: 10.1016/j.jpain.2008.12.001.
- [50] M. E. Briscoe, « Why do people go to the doctor? Sex differences in the correlates of GP consultation », *Social Science & Medicine*, vol. 25, n° 5, p. 507-513, janv. 1987, doi: 10.1016/0277-9536(87)90174-2.
- [51] T. Kuba et V. Quinones-Jenab, « The role of female gonadal hormones in behavioral sex differences in persistent and chronic pain: Clinical versus preclinical studies », *Brain Research Bulletin*, vol. 66, n° 3, p. 179-188, août 2005, doi: 10.1016/j.brainresbull.2005.05.009.
- [52] J. S. Mogil, « Sex differences in pain and pain inhibition: multiple explanations of a controversial phenomenon », *Nat Rev Neurosci*, vol. 13, n° 12, p. 859-866, déc. 2012, doi: 10.1038/nrn3360.
- [53] J. J. Sherman et L. LeResche, « Does experimental pain response vary across the menstrual cycle? A methodological review », *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, vol. 291, n° 2, p. R245-R256, août 2006, doi: 10.1152/ajpregu.00920.2005.
- [54] R. P. Yeziarski, « The Effects of Age on Pain Sensitivity: Preclinical Studies », *Pain Medicine*, vol. 13, n° suppl_2, p. S27-S36, avr. 2012, doi: 10.1111/j.1526-4637.2011.01311.x.
- [55] S. J. Gibson et M. Farrell, « A Review of Age Differences in the Neurophysiology of Nociception and the Perceptual Experience of Pain », *The Clinical Journal of Pain*, vol. 20, n° 4, p. 227-239, août 2004.
- [56] J. Ochoa et W. G. Mair, « The normal sural nerve in man. II. Changes in the axons and Schwann cells due to ageing », *Acta Neuropathol*, vol. 13, n° 3, p. 217-239, janv. 1969, doi: 10.1007/bf00690643.
- [57] Marshall Devor, « Chronic Pain in the Aged: Possible Relation Between Neurogenesis, Involution and Pathophysiology in Adult Sensory Ganglia », *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, vol. 2, n° 1-2, p. 1-16, janv. 1991, doi: 10.1515/JBCPP.1991.2.1-2.1.
- [58] H. K. Beecher, « Pain in Men Wounded in Battle », *Ann Surg*, vol. 123, n° 1, p. 96-105, janv. 1946.

- [59] J. Dezutter, A. Wachholtz, et J. Corveleyn, « Prayer and pain: the mediating role of positive re-appraisal », *J Behav Med*, vol. 34, n° 6, p. 542-549, déc. 2011, doi: 10.1007/s10865-011-9348-2.
- [60] R.-D. Treede, « Chapter 1 Pain and hyperalgesia: definitions and theories », in *Handbook of Clinical Neurology*, vol. 81, F. Cervero et T. S. Jensen, Éd. Elsevier, 2006, p. 3-10. doi: 10.1016/S0072-9752(06)80005-9.
- [61] C. Perruchoud, E. Albrecht, et V. Moret, *Manuel pratique d'algologie: Prise en charge de la douleur chronique*. Elsevier Health Sciences, 2017.
- [62] A. V. Apkarian, M. C. Bushnell, R.-D. Treede, et J.-K. Zubieta, « Human brain mechanisms of pain perception and regulation in health and disease », *Eur J Pain*, vol. 9, n° 4, p. 463-484, août 2005, doi: 10.1016/j.ejpain.2004.11.001.
- [63] R. Melzack et P. D. Wall, « Pain mechanisms: a new theory », *Science*, vol. 150, n° 3699, p. 971-979, nov. 1965, doi: 10.1126/science.150.3699.971.
- [64] R. Kuner, « Central mechanisms of pathological pain », *Nat Med*, vol. 16, n° 11, p. 1258-1266, nov. 2010, doi: 10.1038/nm.2231.
- [65] T. Thompson *et al.*, « The effectiveness of hypnosis for pain relief: A systematic review and meta-analysis of 85 controlled experimental trials », *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 99, p. 298-310, avr. 2019, doi: 10.1016/j.neubiorev.2019.02.013.
- [66] T. Adachi, H. Fujino, A. Nakae, T. Mashimo, et J. Sasaki, « A Meta-Analysis of Hypnosis for Chronic Pain Problems: A Comparison Between Hypnosis, Standard Care, and Other Psychological Interventions », *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*, vol. 62, n° 1, p. 1-28, janv. 2014, doi: 10.1080/00207144.2013.841471.
- [67] A. Del Casale *et al.*, « Hypnosis and pain perception: An Activation Likelihood Estimation (ALE) meta-analysis of functional neuroimaging studies », *Journal of Physiology-Paris*, vol. 109, n° 4, p. 165-172, déc. 2015, doi: 10.1016/j.jphysparis.2016.01.001.
- [68] Kabat-Zinn, « The clinical use of mindfulness meditation for the self-regulation of chronic pain | SpringerLink », 1982.
https://link.springer.com/article/10.1007/BF00845519?utm_medium=affiliate&error=cookies_not_supported&code=177cb438-f2b8-4207-98e3-d6e8271dbe6d (consulté le déc. 01, 2020).
- [69] S. A. Gaylord *et al.*, « Mindfulness Training Reduces the Severity of Irritable Bowel Syndrome in Women: Results of a Randomized Controlled Trial », *Am J Gastroenterol*, vol. 106, n° 9, p. 1678-1688, sept. 2011, doi: 10.1038/ajg.2011.184.
- [70] N.-M. Bakhshani, A. Amirani, H. Amirifard, et M. Shahrakipoor, « The Effectiveness of Mindfulness-Based Stress Reduction on Perceived Pain Intensity and Quality of Life in Patients With Chronic Headache », *Glob J Health Sci*, vol. 8, n° 4, p. 142-151, avr. 2016, doi: 10.5539/gjhs.v8n4p142.
- [71] G. Bernatzky, M. Presch, M. Anderson, et J. Panksepp, « Emotional foundations of music as a non-pharmacological pain management tool in modern medicine », *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 35, n° 9, p. 1989-1999, oct. 2011, doi: 10.1016/j.neubiorev.2011.06.005.
- [72] H. Zhao et A. C. N. Chen, « Both happy and sad melodies modulate tonic human heat pain », *J Pain*, vol. 10, n° 9, p. 953-960, sept. 2009, doi: 10.1016/j.jpain.2009.03.006.
- [73] M. Roy, I. Peretz, et P. Rainville, « Emotional valence contributes to music-induced analgesia », *Pain*, vol. 134, n° 1, p. 140-147, janv. 2008, doi: 10.1016/j.pain.2007.04.003.
- [74] L. Magill-Levreault, « Music Therapy in Pain and Symptom Management », *J Palliat Care*, vol. 9, n° 4, p. 42-48, déc. 1993, doi: 10.1177/082585979300900411.
- [75] R. G. Locsin, « The effect of music on the pain of selected post-operative patients », *J Adv Nurs*, vol. 6, n° 1, p. 19-25, janv. 1981, doi: 10.1111/j.1365-2648.1981.tb03091.x.
- [76] A. Ebneshahidi et M. Mohseni, « The Effect of Patient-Selected Music on Early Postoperative Pain, Anxiety, and Hemodynamic Profile in Cesarean Section Surgery », *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, vol. 14, n° 7, p. 827-831, sept. 2008, doi: 10.1089/acm.2007.0752.

- [77] Y. Kukimoto, N. Ooe, et N. Ideguchi, « The Effects of Massage Therapy on Pain and Anxiety after Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis », *Pain Management Nursing*, vol. 18, n° 6, p. 378-390, déc. 2017, doi: 10.1016/j.pmn.2017.09.001.
- [78] C. A. Moyer, J. Rounds, et J. W. Hannum, « A Meta-Analysis of Massage Therapy Research », *Psychological Bulletin*, vol. 130, n° 1, p. 3-18, 2004, doi: 10.1037/0033-2909.130.1.3.
- [79] T. M. Field, « Massage therapy effects », *American Psychologist*, vol. 53, n° 12, p. 1270-1281, 1998, doi: 10.1037/0003-066X.53.12.1270.
- [80] A. C. de C. Williams, E. Fisher, L. Hearn, et C. Eccleston, « Psychological therapies for the management of chronic pain (excluding headache) in adults », *Cochrane Database of Systematic Reviews*, n° 8, 2020, doi: 10.1002/14651858.CD007407.pub4.
- [81] AdTV, *Fervex - Publicité*, (déc. 10, 2019). Consulté le: oct. 12, 2021. [En ligne Video]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=8X27dFpVuXM>
- [82] AdTV, *NurofenFlash 400 mg « une solution efficace pour vous soulager » Pub 30s*, (déc. 13, 2019). Consulté le: oct. 12, 2021. [En ligne Video]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=KaxS04Wa-pM>
- [83] AdTV, *Strepsils Lidocaïne « pour soulager localement la douleur » Pub 15s*, (janv. 05, 2020). Consulté le: oct. 12, 2021. [En ligne Video]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=GU8Ym5A3L-0>
- [84] AdTV, *Voltaren Actigo 2% intense gel « Max le chien » - Publicité 0:20*, (févr. 13, 2020). Consulté le: oct. 12, 2021. [En ligne Video]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=24w3Ykyp64o>
- [85] A. Unruh, P. McGrath, S. J. Cunningham, et P. Humphreys, « Children's drawings of their pain », *Pain*, vol. 17, n° 4, p. 385-392, déc. 1983, doi: 10.1016/0304-3959(83)90170-7.
- [86] M. Savedra, P. Gibbons, M. Tesler, J. Ward, et C. Wegner, « How do children describe pain? A tentative assessment », *PAIN*, vol. 14, n° 2, p. 95-104, oct. 1982, doi: 10.1016/0304-3959(82)90091-4.
- [87] E. Pantoula, D. Damigos, A. Poulou, et M. Gouva, « Symbolism of Pain: An Alternative Approach to Pain Means between Patients and Healthy Individuals. », *International Journal of Caring Sciences*, vol. 10, n° 1, 2017.
- [88] D. Jongudomkarn, N. Aungsupakorn, et L. Camfield, « The meanings of pain: A qualitative study of the perspectives of children living with pain in north-eastern Thailand », *Nursing & Health Sciences*, vol. 8, n° 3, p. 156-163, 2006, doi: 10.1111/j.1442-2018.2006.00273.x.
- [89] C. J. Boyatzis et R. Varghese, « Children's emotional associations with colors », *The Journal of genetic psychology*, vol. 155, n° 1, p. 77-85, 1994.
- [90] M. Hemphill, « A note on adults' color-emotion associations », *The Journal of genetic psychology*, vol. 157, n° 3, p. 275-280, 1996.
- [91] A. Choungourian, « Color Preferences and Cultural Variation », *Percept Mot Skills*, vol. 26, n° 3_suppl, p. 1203-1206, juin 1968, doi: 10.2466/pms.1968.26.3c.1203.
- [92] N. Kaya et H. H. Epps, « Relationship between color and emotion: A study of college students », *College student journal*, vol. 38, n° 3, p. 396-405, 2004.
- [93] A. J. Elliot et H. Aarts, « Perception of the color red enhances the force and velocity of motor output », *Emotion*, vol. 11, n° 2, p. 445-449, 2011, doi: 10.1037/a0022599.
- [94] G. L. Moseley et A. Arntz, « The context of a noxious stimulus affects the pain it evokes », *PAIN®*, vol. 133, n° 1, p. 64-71, déc. 2007, doi: 10.1016/j.pain.2007.03.002.
- [95] K. Wiercioch-Kuzianik et P. Babel, « Color Hurts. The Effect of Color on Pain Perception », *Pain Medicine*, vol. 20, n° 10, p. 1955-1962, oct. 2019, doi: 10.1093/pm/pny285.
- [96] B. Arnaldi, P. Fuchs, et J. Tisseau, « Chapitre 1 les concepts de base de la réalité virtuelle [Chapter 1 the basic concepts of virtual reality] », *Le traité de la réalité virtuelle*, p. 3-52, 2003.
- [97] M. Slater, « A note on presence terminology », *Presence connect*, vol. 3, n° 3, p. 1-5, 2003.
- [98] D. A. Bowman et R. P. McMahan, « Virtual reality: how much immersion is enough? », *Computer*, vol. 40, n° 7, p. 36-43, 2007.
- [99] K. M. Lee, « Presence, explicated », *Communication theory*, vol. 14, n° 1, p. 27-50, 2004.

- [100] M. V. Sanchez-Vives et M. Slater, « From presence to consciousness through virtual reality », *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 6, n° 4, Art. n° 4, avr. 2005, doi: 10.1038/nrn1651.
- [101] C. Hendrix et W. Barfield, « Presence within Virtual Environments as a Function of Visual Display Parameters », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 5, n° 3, p. 274-289, août 1996, doi: 10.1162/pres.1996.5.3.274.
- [102] W. Barfield, K. M. Baird, et O. J. Bjorneseth, « Presence in virtual environments as a function of type of input device and display update rate », *Displays*, vol. 19, n° 2, p. 91-98, oct. 1998, doi: 10.1016/S0141-9382(98)00041-9.
- [103] W. Barfield, C. Hendrix, et K.-E. Bystrom, « Effects of Stereopsis and Head Tracking on Performance Using Desktop Virtual Environment Displays », *Presence*, vol. 8, n° 2, p. 237-240, avr. 1999, doi: 10.1162/105474699566198.
- [104] C. Hendrix et W. Barfield, « The Sense of Presence within Auditory Virtual Environments », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 5, n° 3, p. 290-301, août 1996, doi: 10.1162/pres.1996.5.3.290.
- [105] C. Basdogan, C. Ho, M. Srinivasan, et M. Slater, « An Experimental Study on the Role of Touch in Shared Virtual Environments », *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 7, juill. 2001, doi: 10.1145/365058.365082.
- [106] M. Slater et M. Usoh, « Representations Systems, Perceptual Position, and Presence in Immersive Virtual Environments », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 2, n° 3, p. 221-233, août 1993, doi: 10.1162/pres.1993.2.3.221.
- [107] M. Slater, J. McCarthy, et F. Maringelli, « The Influence of Body Movement on Subjective Presence in Virtual Environments », *Hum Factors*, vol. 40, n° 3, p. 469-477, sept. 1998, doi: 10.1518/001872098779591368.
- [108] M. Slater, M. Usoh, et A. Steed, « Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality », *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, vol. 2, n° 3, p. 201-219, sept. 1995, doi: 10.1145/210079.210084.
- [109] M. Slater et A. Steed, « A Virtual Presence Counter », *Presence*, vol. 9, n° 5, p. 413-434, oct. 2000, doi: 10.1162/105474600566925.
- [110] M. V. Sanchez-Vives et M. Slater, « From presence to consciousness through virtual reality », *Nat Rev Neurosci*, vol. 6, n° 4, p. 332-339, avr. 2005, doi: 10.1038/nrn1651.
- [111] W. E. Mehling, V. Gopisetty, J. Daubenmier, C. J. Price, F. M. Hecht, et A. Stewart, « Body Awareness: Construct and Self-Report Measures », *PLOS ONE*, vol. 4, n° 5, p. e5614, mai 2009, doi: 10.1371/journal.pone.0005614.
- [112] M. Botvinick et J. Cohen, « Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see », *Nature*, vol. 391, n° 6669, Art. n° 6669, févr. 1998, doi: 10.1038/35784.
- [113] H. H. Ehrsson, C. Spence, et R. E. Passingham, « That’s My Hand! Activity in Premotor Cortex Reflects Feeling of Ownership of a Limb », *Science*, vol. 305, n° 5685, p. 875-877, août 2004, doi: 10.1126/science.1097011.
- [114] V. I. Petkova et H. H. Ehrsson, « If I Were You: Perceptual Illusion of Body Swapping », *PLOS ONE*, vol. 3, n° 12, p. e3832, déc. 2008, doi: 10.1371/journal.pone.0003832.
- [115] M. Tsakiris et P. Haggard, « The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 31, n° 1, p. 80-91, 2005, doi: 10.1037/0096-1523.31.1.80.
- [116] K. Kilteni, R. Groten, et M. Slater, « The Sense of Embodiment in Virtual Reality », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 21, n° 4, p. 373-387, nov. 2012, doi: 10.1162/PRES_a_00124.
- [117] M. Gonzalez-Franco et T. C. Peck, « Avatar Embodiment. Towards a Standardized Questionnaire », *Front. Robot. AI*, vol. 5, 2018, doi: 10.3389/frobt.2018.00074.
- [118] M. Slater, D. Pérez Marcos, H. Ehrsson, et M. Sanchez-Vives, « Towards a digital body: the virtual arm illusion », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 2, p. 6, 2008, doi: 10.3389/neuro.09.006.2008.

- [119] H. H. Ehrsson, « The Experimental Induction of Out-of-Body Experiences », *Science*, vol. 317, n° 5841, p. 1048-1048, août 2007, doi: 10.1126/science.1142175.
- [120] B. Lenggenhager, T. Tadi, T. Metzinger, et O. Blanke, « Video Ergo Sum: Manipulating Bodily Self-Consciousness », *Science*, vol. 317, n° 5841, p. 1096-1099, août 2007, doi: 10.1126/science.1143439.
- [121] V. I. Petkova et H. H. Ehrsson, « When Right Feels Left: Referral of Touch and Ownership between the Hands », *PLOS ONE*, vol. 4, n° 9, p. e6933, sept. 2009, doi: 10.1371/journal.pone.0006933.
- [122] K. Vogeley, M. May, A. Ritzl, P. Falkai, K. Zilles, et G. R. Fink, « Neural correlates of first-person perspective as one constituent of human self-consciousness », *J Cogn Neurosci*, vol. 16, n° 5, p. 817-827, juin 2004, doi: 10.1162/089892904970799.
- [123] E. Kokkinara, K. Kiltner, K. J. Blom, et M. Slater, « First Person Perspective of Seated Participants Over a Walking Virtual Body Leads to Illusory Agency Over the Walking », *Sci Rep*, vol. 6, n° 1, p. 28879, juill. 2016, doi: 10.1038/srep28879.
- [124] D. Burin, Y. Liu, N. Yamaya, et R. Kawashima, « Virtual training leads to physical, cognitive and neural benefits in healthy adults », *Neuroimage*, vol. 222, p. 117297, nov. 2020, doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.117297.
- [125] F. Argelaguet, L. Hoyet, M. Trico, et A. Lecuyer, « The role of interaction in virtual embodiment: Effects of the virtual hand representation », in *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, mars 2016, p. 3-10. doi: 10.1109/VR.2016.7504682.
- [126] A. Kalckert et H. Ehrsson, « Moving a Rubber Hand that Feels Like Your Own: A Dissociation of Ownership and Agency », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 6, p. 40, 2012, doi: 10.3389/fnhum.2012.00040.
- [127] T. Dummer, A. Picot-Annand, T. Neal, et C. Moore, « Movement and the Rubber Hand Illusion », *Perception*, vol. 38, n° 2, p. 271-280, févr. 2009, doi: 10.1068/p5921.
- [128] M. Tsakiris, G. Prabhu, et P. Haggard, « Having a body versus moving your body: How agency structures body-ownership », *Consciousness and Cognition*, vol. 15, n° 2, p. 423-432, juin 2006, doi: 10.1016/j.concog.2005.09.004.
- [129] O. Blanke et T. Metzinger, « Full-body illusions and minimal phenomenal selfhood », *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 13, n° 1, p. 7-13, janv. 2009, doi: 10.1016/j.tics.2008.10.003.
- [130] S. Nagamine, Y. Hayashi, S. Yano, et T. Kondo, « An immersive virtual reality system for investigating human bodily self-consciousness », in *2016 Fifth ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC)*, mai 2016, p. 97-100. doi: 10.1109/ICT-ISPC.2016.7519245.
- [131] M. V. Sanchez-Vives, B. Spanlang, A. Frisoli, M. Bergamasco, et M. Slater, « Virtual Hand Illusion Induced by Visuomotor Correlations », *PLOS ONE*, vol. 5, n° 4, p. e10381, avr. 2010, doi: 10.1371/journal.pone.0010381.
- [132] E. Kokkinara et M. Slater, « Measuring the Effects through Time of the Influence of Visuomotor and Visuotactile Synchronous Stimulation on a Virtual Body Ownership Illusion », *Perception*, vol. 43, n° 1, p. 43-58, janv. 2014, doi: 10.1068/p7545.
- [133] A. Maselli et M. Slater, « The building blocks of the full body ownership illusion », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, p. 83, 2013, doi: 10.3389/fnhum.2013.00083.
- [134] P. Bourdin, I. Barberia, R. Oliva, et M. Slater, « A Virtual Out-of-Body Experience Reduces Fear of Death », *PLOS ONE*, vol. 12, n° 1, p. e0169343, janv. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0169343.
- [135] M. Schaefer, H. Flor, H.-J. Heinze, et M. Rotte, « Morphing the body: Illusory feeling of an elongated arm affects somatosensory homunculus », *NeuroImage*, vol. 36, n° 3, p. 700-705, juill. 2007, doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.03.046.
- [136] K. Kiltner, J.-M. Normand, M. V. Sanchez-Vives, et M. Slater, « Extending Body Space in Immersive Virtual Reality: A Very Long Arm Illusion », *PLOS ONE*, vol. 7, n° 7, p. e40867, juill. 2012, doi: 10.1371/journal.pone.0040867.

- [137] C. Preston et R. Newport, « How Long is Your Arm? Using Multisensory Illusions to Modify Body Image from the Third Person Perspective », *Perception*, vol. 41, n° 2, p. 247-249, févr. 2012, doi: 10.1068/p7103.
- [138] A. Haans, W. A. IJsselstein, et Y. A. W. de Kort, « The effect of similarities in skin texture and hand shape on perceived ownership of a fake limb », *Body Image*, vol. 5, n° 4, p. 389-394, déc. 2008, doi: 10.1016/j.bodyim.2008.04.003.
- [139] C. J. Bohil, B. Alicea, et F. A. Biocca, « Virtual reality in neuroscience research and therapy », *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 12, n° 12, Art. n° 12, déc. 2011, doi: 10.1038/nrn3122.
- [140] V. D. Bohbot, J. Lerch, B. Thorndycraft, G. Iaria, et A. P. Zijdenbos, « Gray Matter Differences Correlate with Spontaneous Strategies in a Human Virtual Navigation Task », *J. Neurosci.*, vol. 27, n° 38, p. 10078-10083, sept. 2007, doi: 10.1523/JNEUROSCI.1763-07.2007.
- [141] I. Driscoll, D. A. Hamilton, R. A. Yeo, W. M. Brooks, et R. J. Sutherland, « Virtual navigation in humans: the impact of age, sex, and hormones on place learning », *Horm Behav*, vol. 47, n° 3, p. 326-335, mars 2005, doi: 10.1016/j.yhbeh.2004.11.013.
- [142] S. D. Moffat, K. M. Kennedy, K. M. Rodrigue, et N. Raz, « Extrahippocampal Contributions to Age Differences in Human Spatial Navigation », *Cerebral Cortex*, vol. 17, n° 6, p. 1274-1282, juin 2007, doi: 10.1093/cercor/bhl036.
- [143] M. Slater, B. Spanlang, M. V. Sanchez-Vives, et O. Blanke, « First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality », *PLOS ONE*, vol. 5, n° 5, p. e10564, mai 2010, doi: 10.1371/journal.pone.0010564.
- [144] M. Slater *et al.*, « A Virtual Reprise of the Stanley Milgram Obedience Experiments », *PLOS ONE*, vol. 1, n° 1, p. e39, déc. 2006, doi: 10.1371/journal.pone.0000039.
- [145] A. Gorini et G. Riva, « Virtual reality in anxiety disorders: the past and the future », *Expert Rev Neurother*, vol. 8, n° 2, p. 215-233, févr. 2008, doi: 10.1586/14737175.8.2.215.
- [146] F. D. Rose, Barbara. M. Brooks, et A. A. Rizzo, « Virtual Reality in Brain Damage Rehabilitation: Review », *CyberPsychology & Behavior*, vol. 8, n° 3, p. 241-262, juin 2005, doi: 10.1089/cpb.2005.8.241.
- [147] M. S. Cameirão, S. B. I. Badia, E. D. Oller, et P. F. M. J. Verschure, « Neurorehabilitation using the virtual reality based Rehabilitation Gaming System: methodology, design, psychometrics, usability and validation », *J Neuroeng Rehabil*, vol. 7, p. 48, sept. 2010, doi: 10.1186/1743-0003-7-48.
- [148] M. Dozza, F. B. Horak, et L. Chiari, « Auditory biofeedback substitutes for loss of sensory information in maintaining stance », *Exp Brain Res*, vol. 178, n° 1, p. 37-48, mars 2007, doi: 10.1007/s00221-006-0709-y.
- [149] H. G. Hoffman, J. N. Doctor, D. R. Patterson, G. J. Carrougner, et T. A. Furness, « Virtual reality as an adjunctive pain control during burn wound care in adolescent patients », *Pain*, vol. 85, n° 1, p. 305-309, mars 2000, doi: 10.1016/S0304-3959(99)00275-4.
- [150] H. G. Hoffman, D. R. Patterson, et G. J. Carrougner, « Use of virtual reality for adjunctive treatment of adult burn pain during physical therapy: a controlled study », *The Clinical Journal of Pain*, vol. 16, n° 3, p. 244-250, 2000.
- [151] H. G. Hoffman, D. R. Patterson, G. J. Carrougner, et S. R. Sharar, « Effectiveness of Virtual Reality-Based Pain Control With Multiple Treatments », *The Clinical Journal of Pain*, vol. 17, n° 3, p. 229-235, sept. 2001, doi: 10.1097/00002508-200109000-00007.
- [152] H. G. Hoffman, T. Richards, B. Coda, A. Richards, et S. R. Sharar, « The Illusion of Presence in Immersive Virtual Reality during an fMRI Brain Scan », *CyberPsychology & Behavior*, vol. 6, n° 2, p. 127-131, avr. 2003, doi: 10.1089/109493103321640310.
- [153] E. Steele, K. Grimmer, B. Thomas, B. Mulley, I. Fulton, et H. Hoffman, « Virtual Reality as a Pediatric Pain Modulation Technique: A Case Study », *CyberPsychology & Behavior*, vol. 6, n° 6, p. 633-638, déc. 2003, doi: 10.1089/109493103322725405.
- [154] H. G. Hoffman *et al.*, « Manipulating presence influences the magnitude of virtual reality analgesia », *Pain*, vol. 111, n° 1, p. 162-168, sept. 2004, doi: 10.1016/j.pain.2004.06.013.

- [155] H. G. Hoffman *et al.*, « Water-friendly virtual reality pain control during wound care », *Journal of Clinical Psychology*, vol. 60, n° 2, p. 189-195, 2004, doi: <https://doi.org/10.1002/jclp.10244>.
- [156] D. R. Patterson, J. R. Tinenen, A. E. Schmidt, et S. R. Sharar, « Virtual Reality Hypnosis: A Case Report », *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*, vol. 52, n° 1, p. 27-38, janv. 2004, doi: 10.1076/iceh.52.1.27.23925.
- [157] S. W. Askay, D. R. Patterson, et S. R. Sharar, « Virtual reality hypnosis », *Contemporary Hypnosis*, vol. 26, n° 1, p. 40-47, mars 2009, doi: 10.1002/ch.371.
- [158] J. Gershon, E. Zimand, R. Lemos, B. O. Rothbaum, et L. Hodges, « Use of Virtual Reality as a Distractor for Painful Procedures in a Patient with Pediatric Cancer: A Case Study », *CyberPsychology & Behavior*, vol. 6, n° 6, p. 657-661, déc. 2003, doi: 10.1089/109493103322725450.
- [159] H. G. Hoffman, A. Garcia-Palacios, V. Kapa, J. Beecher, et S. R. Sharar, « Immersive Virtual Reality for Reducing Experimental Ischemic Pain », *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 15, n° 3, Art. n° 3, juin 2003, doi: 10.1207/S15327590IJHC1503_10.
- [160] E. A. Chan, J. W. Chung, T. K. Wong, A. S. Lien, et J. Y. Yang, « Application of a virtual reality prototype for pain relief of pediatric burn in Taiwan », *Journal of Clinical Nursing*, vol. 16, n° 4, Art. n° 4, avr. 2007, doi: 10.1111/j.1365-2702.2006.01719.x.
- [161] A. K. Rosenstiel et F. J. Keefe, « The use of coping strategies in chronic low back pain patients: relationship to patient characteristics and current adjustment », *Pain*, vol. 17, n° 1, p. 33-44, sept. 1983, doi: 10.1016/0304-3959(83)90125-2.
- [162] J. A. Turner et S. Clancy, « Strategies for coping with chronic low back pain: Relationship to pain and disability », *Pain*, vol. 24, n° 3, p. 355-364, mars 1986, doi: 10.1016/0304-3959(86)90121-1.
- [163] F. J. Keefe, J. Crisson, B. J. Urban, et D. A. Williams, « Analyzing chronic low back pain: the relative contribution of pain coping strategies », *Pain*, vol. 40, n° 3, p. 293-301, mars 1990, doi: 10.1016/0304-3959(90)91126-4.
- [164] L. Goubert, G. Crombez, C. Eccleston, et J. Devulder, « Distraction from chronic pain during a pain-inducing activity is associated with greater post-activity pain », *Pain*, vol. 110, n° 1, p. 220-227, juill. 2004, doi: 10.1016/j.pain.2004.03.034.
- [165] L. Goubert, G. Crombez, et C. Eccleston, « Hypnosis/distraction: Distraction from chronic pain during a pain-inducing activity is associated with greater post-activity pain », *The Journal of Pain*, vol. 5, n° 3, p. S96, avr. 2004, doi: 10.1016/j.jpain.2004.02.355.
- [166] D. Cioffi et J. Holloway, « Delayed costs of suppressed pain », *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 64, n° 2, p. 274-282, 1993, doi: 10.1037/0022-3514.64.2.274.
- [167] J. W. Burns, « The role of attentional strategies in moderating links between acute pain induction and subsequent psychological stress: Evidence for symptom-specific reactivity among patients with chronic pain versus healthy nonpatients », *Emotion*, vol. 6, n° 2, p. 180-192, 2006, doi: 10.1037/1528-3542.6.2.180.
- [168] H. Flor, C. Denke, M. Schaefer, et S. Grüsser, « Effect of sensory discrimination training on cortical reorganisation and phantom limb pain », *The Lancet*, vol. 357, n° 9270, p. 1763-1764, juin 2001, doi: 10.1016/S0140-6736(00)04890-X.
- [169] H. Flor, « The Modification of Cortical Reorganization and Chronic Pain by Sensory Feedback », *Appl Psychophysiol Biofeedback*, vol. 27, n° 3, p. 215-227, sept. 2002, doi: 10.1023/A:1016204029162.
- [170] V. S. Ramachandran et D. Rogers-Ramachandran, « Synaesthesia in Phantom Limbs Induced with Mirrors », p. 11, 1996.
- [171] J. Cole, S. Crowle, G. Austwick, et D. Henderson Slater, « Exploratory findings with virtual reality for phantom limb pain; from stump motion to agency and analgesia », *Disability and Rehabilitation*, vol. 31, n° 10, Art. n° 10, janv. 2009, doi: 10.1080/09638280802355197.
- [172] K. Sato *et al.*, « Nonimmersive Virtual Reality Mirror Visual Feedback Therapy and Its Application for the Treatment of Complex Regional Pain Syndrome: An Open-Label Pilot

- Study », *Pain Med*, vol. 11, n° 4, p. 622-629, avr. 2010, doi: 10.1111/j.1526-4637.2010.00819.x.
- [173] C. D. Murray *et al.*, « The treatment of phantom limb pain using immersive virtual reality: Three case studies », *Disability and Rehabilitation*, vol. 29, n° 18, Art. n° 18, janv. 2007, doi: 10.1080/09638280601107385.
- [174] A. Weeth, A. Mühlberger, et Y. Shibani, « Was it less painful for knights? Influence of appearance on pain perception », *European Journal of Pain*, vol. 21, n° 10, Art. n° 10, nov. 2017, doi: 10.1002/ejp.1087.
- [175] A. Zanini, M. Montalti, B. Caola, A. Leadbetter, et M. Martini, « Pain During Illusory Own Arm Movement: A Study in Immersive Virtual Reality », *European Medical Journal*, vol. 2, n° 2, Art. n° 2, juin 2017.
- [176] B. Nierula, M. Martini, M. Matamala-Gomez, M. Slater, et M. V. Sanchez-Vives, « Seeing an Embodied Virtual Hand is Analgesic Contingent on Colocation », *J Pain*, vol. 18, n° 6, p. 645-655, juin 2017, doi: 10.1016/j.jpain.2017.01.003.
- [177] M. Martini, D. Perez-Marcos, et M. V. Sanchez-Vives, « Modulation of pain threshold by virtual body ownership: Virtual body ownership and pain threshold », *European Journal of Pain*, vol. 18, n° 7, Art. n° 7, août 2014, doi: 10.1002/j.1532-2149.2014.00451.x.
- [178] M. R. Longo, V. Betti, S. M. Aglioti, et P. Haggard, « Visually Induced Analgesia: Seeing the Body Reduces Pain », *Journal of Neuroscience*, vol. 29, n° 39, Art. n° 39, sept. 2009, doi: 10.1523/JNEUROSCI.3072-09.2009.
- [179] M. R. Longo, G. D. Iannetti, F. Mancini, J. Driver, et P. Haggard, « Linking Pain and the Body: Neural Correlates of Visually Induced Analgesia », *Journal of Neuroscience*, vol. 32, n° 8, Art. n° 8, févr. 2012, doi: 10.1523/JNEUROSCI.4031-11.2012.
- [180] D. Romano, J. Llobera, et O. Blanke, « Size and Viewpoint of an Embodied Virtual Body Affect the Processing of Painful Stimuli », *The Journal of Pain*, vol. 17, n° 3, p. 350-358, mars 2016, doi: 10.1016/j.jpain.2015.11.005.
- [181] F. Mancini, M. R. Longo, M. P. M. Kammers, et P. Haggard, « Visual Distortion of Body Size Modulates Pain Perception », *Psychological Science*, vol. 22, n° 3, Art. n° 3, mars 2011, doi: 10.1177/0956797611398496.
- [182] M. Osumi, R. Imai, K. Ueta, H. Nakano, S. Nobusako, et S. Morioka, « Factors associated with the modulation of pain by visual distortion of body size », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 8, mars 2014, doi: 10.3389/fnhum.2014.00137.
- [183] G. L. Moseley, T. J. Parsons, et C. Spence, « Visual distortion of a limb modulates the pain and swelling evoked by movement », *Current Biology*, vol. 18, n° 22, p. R1047-R1048, nov. 2008, doi: 10.1016/j.cub.2008.09.031.
- [184] M. Villiger *et al.*, « Virtual Reality–Augmented Neurorehabilitation Improves Motor Function and Reduces Neuropathic Pain in Patients With Incomplete Spinal Cord Injury », *Neurorehabilitation and Neural Repair*, vol. 27, n° 8, Art. n° 8, oct. 2013, doi: 10.1177/1545968313490999.
- [185] A. Hänsel, B. Lenggenhager, R. von Känel, M. Curatolo, et O. Blanke, « Seeing and identifying with a virtual body decreases pain perception », *European Journal of Pain*, vol. 15, n° 8, p. 874-879, sept. 2011, doi: 10.1016/j.ejpain.2011.03.013.
- [186] D. Romano, C. Pfeiffer, A. Maravita, et O. Blanke, « Illusory self-identification with an avatar reduces arousal responses to painful stimuli », *Behavioural Brain Research*, vol. 261, p. 275-281, mars 2014, doi: 10.1016/j.bbr.2013.12.049.
- [187] P. Pozeg *et al.*, « Virtual reality improves embodiment and neuropathic pain caused by spinal cord injury », *Neurology*, vol. 89, n° 18, Art. n° 18, oct. 2017, doi: 10.1212/WNL.0000000000004585.
- [188] M. Martini, K. Kilteni, A. Maselli, et M. V. Sanchez-Vives, « The body fades away: investigating the effects of transparency of an embodied virtual body on pain threshold and body ownership », *Scientific Reports*, vol. 5, n° 1, Art. n° 1, nov. 2015, doi: 10.1038/srep13948.

- [189] M. Martini, D. Perez-Marcos, et M. V. Sanchez-Vives, « What Color is My Arm? Changes in Skin Color of an Embodied Virtual Arm Modulates Pain Threshold », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, 2013, doi: 10.3389/fnhum.2013.00438.
- [190] « Logiciel 3ds Max | Connaître les prix et acheter le logiciel 3ds Max 2022 officiel ». <https://www.autodesk.fr/products/3ds-max/overview> (consulté le déc. 05, 2021).
- [191] « MICROMED ». <http://www.micromed-france.fr/> (consulté le déc. 05, 2021).
- [192] C. Ring, M. Kavussanu, et A. Willoughby, « Pain thresholds, pain-induced frontal alpha activity and pain-related evoked potentials are associated with antisocial behavior and aggressiveness in athletes », *Psychology of Sport and Exercise*, vol. 22, p. 303-311, janv. 2016, doi: 10.1016/j.psychsport.2015.09.003.
- [193] M. Wilkinson, D. McIntyre, et L. Edwards, « Electrocutaneous pain thresholds are higher during systole than diastole », *Biological Psychology*, vol. 94, n° 1, p. 71-73, sept. 2013, doi: 10.1016/j.biopsycho.2013.05.002.
- [194] K. M. Malloy et L. S. Milling, « The effectiveness of virtual reality distraction for pain reduction: A systematic review », *Clinical Psychology Review*, vol. 30, n° 8, Art. n° 8, déc. 2010, doi: 10.1016/j.cpr.2010.07.001.
- [195] « Rubber Hands Feel the Touch of Light - Frank H. Durgin, Laurel Evans, Natalie Dunphy, Susan Klostermann, Kristina Simmons, 2007 ». https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1111/j.1467-9280.2007.01865.x?casa_token=yW6EOE97D6kAAAAA%3A73ibuaJvvmz7SK8ZylhaTWPvajzYgDYq0512LwCt25AGdidbsBBalelYzirNol7K601Z5v5c0Hn1foo (consulté le nov. 18, 2021).
- [196] M. Fusaro, G. Tieri, et S. M. Aglioti, « Seeing pain and pleasure on self and others: behavioral and psychophysiological reactivity in immersive virtual reality », *Journal of Neurophysiology*, vol. 116, n° 6, p. 2656-2662, déc. 2016, doi: 10.1152/jn.00489.2016.
- [197] A. Kalckert et H. H. Ehrsson, « The moving rubber hand illusion revisited: Comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership », *Consciousness and Cognition*, vol. 26, p. 117-132, mai 2014, doi: 10.1016/j.concog.2014.02.003.
- [198] P. Hluštík, A. Solodkin, R. P. Gullapalli, D. C. Noll, et S. L. Small, « Somatotopy in Human Primary Motor and Somatosensory Hand Representations Revisited », *Cerebral Cortex*, vol. 11, n° 4, p. 312-321, avr. 2001, doi: 10.1093/cercor/11.4.312.
- [199] D. Malinvaud *et al.*, « Auditory and visual 3D virtual reality therapy as a new treatment for chronic subjective tinnitus: Results of a randomized controlled trial », *Hearing Research*, vol. 333, p. 127-135, mars 2016, doi: 10.1016/j.heares.2015.12.023.
- [200] M. Martini, D. Perez-Marcos, et M. V. Sanchez-Vives, « Modulation of pain threshold by virtual body ownership », *Eur J Pain*, vol. 18, n° 7, p. 1040-1048, août 2014, doi: 10.1002/j.1532-2149.2014.00451.x.
- [201] M. Martini, « Real, rubber or virtual: The vision of “one’s own” body as a means for pain modulation. A narrative review », *Consciousness and Cognition*, vol. 43, p. 143-151, juill. 2016, doi: 10.1016/j.concog.2016.06.005.
- [202] M. Tsakiris, M. D. Hesse, C. Boy, P. Haggard, et G. R. Fink, « Neural Signatures of Body Ownership: A Sensory Network for Bodily Self-Consciousness », *Cerebral Cortex*, vol. 17, n° 10, p. 2235-2244, oct. 2007, doi: 10.1093/cercor/bhl131.
- [203] N. Franck *et al.*, « Defective Recognition of One’s Own Actions in Patients With Schizophrenia », *AJP*, vol. 158, n° 3, p. 454-459, mars 2001, doi: 10.1176/appi.ajp.158.3.454.
- [204] S. Shimada, K. Fukuda, et K. Hiraki, « Rubber Hand Illusion under Delayed Visual Feedback », *PLOS ONE*, vol. 4, n° 7, p. e6185, juill. 2009, doi: 10.1371/journal.pone.0006185.
- [205] « Rubber hands feel the touch of light - PubMed ». <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17425536/> (consulté le nov. 22, 2021).
- [206] E. Kokkinara et M. Slater, « Measuring the Effects through Time of the Influence of Visuomotor and Visuotactile Synchronous Stimulation on a Virtual Body Ownership Illusion », *Perception*, vol. 43, n° 1, p. 43-58, janv. 2014, doi: 10.1068/p7545.

- [207] E. Facco *et al.*, « The Neurophenomenology of Out-of-Body Experiences Induced by Hypnotic Suggestions », *International Journal of Clinical and Experimental Hypnosis*, vol. 67, n° 1, p. 39-68, janv. 2019, doi: 10.1080/00207144.2019.1553762.
- [208] S. Palmisano, R. S. Allison, M. M. Schira, et R. J. Barry, « Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases », *Frontiers in Psychology*, vol. 6, p. 193, 2015, doi: 10.3389/fpsyg.2015.00193.
- [209] H. G. Hoffman *et al.*, « The Effectiveness of Virtual Reality Pain Control With Multiple Treatments of Longer Durations: A Case Study », *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 13, n° 1, Art. n° 1, mars 2001, doi: 10.1207/S15327590IJHC1301_1.
- [210] H. G. Hoffman *et al.*, « Water-friendly virtual reality pain control during wound care », *Journal of Clinical Psychology*, vol. 60, n° 2, Art. n° 2, févr. 2004, doi: 10.1002/jclp.10244.
- [211] J. Gershon, E. Zimand, R. Lemos, B. O. Rothbaum, et L. Hodges, « Use of Virtual Reality as a Distractor for Painful Procedures in a Patient with Pediatric Cancer: A Case Study », *CyberPsychology & Behavior*, vol. 6, n° 6, Art. n° 6, déc. 2003, doi: 10.1089/109493103322725450.
- [212] M. F. Sajeev *et al.*, « Interactive video games to reduce paediatric procedural pain and anxiety: a systematic review and meta-analysis », *British Journal of Anaesthesia*, vol. 127, n° 4, p. 608-619, oct. 2021, doi: 10.1016/j.bja.2021.06.039.
- [213] A. Patel *et al.*, « Distraction with a hand-held video game reduces pediatric preoperative anxiety », *Paediatr Anaesth*, vol. 16, n° 10, p. 1019-1027, oct. 2006, doi: 10.1111/j.1460-9592.2006.01914.x.
- [214] K. D. McCaul et J. M. Malott, « Distraction and coping with pain », *Psychological Bulletin*, vol. 95, n° 3, p. 516-533, 1984, doi: 10.1037/0033-2909.95.3.516.
- [215] A. Gallace, D. M. E. Torta, G. L. Moseley, et G. D. Iannetti, « The analgesic effect of crossing the arms », *PAIN*, vol. 152, n° 6, p. 1418-1423, juin 2011, doi: 10.1016/j.pain.2011.02.029.
- [216] D. Romano et A. Maravita, « The visual size of one's own hand modulates pain anticipation and perception », *Neuropsychologia*, vol. 57, p. 93-100, mai 2014, doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.03.002.
- [217] G. Gorisse, O. Christmann, E. A. Amato, et S. Richir, « First- and Third-Person Perspectives in Immersive Virtual Environments: Presence and Performance Analysis of Embodied Users », *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 4, p. 33, 2017, doi: 10.3389/frobt.2017.00033.
- [218] V. Petkova, M. Khoshnevis, et H. H. Ehrsson, « The Perspective Matters! Multisensory Integration in Ego-Centric Reference Frames Determines Full-Body Ownership », *Frontiers in Psychology*, vol. 2, p. 35, 2011, doi: 10.3389/fpsyg.2011.00035.
- [219] V. I. Petkova, M. Björnsdotter, G. Gentile, T. Jonsson, T.-Q. Li, et H. H. Ehrsson, « From Part- to Whole-Body Ownership in the Multisensory Brain », *Current Biology*, vol. 21, n° 13, p. 1118-1122, juill. 2011, doi: 10.1016/j.cub.2011.05.022.
- [220] H. G. Debarba, S. Bovet, R. Salomon, O. Blanke, B. Herbelin, et R. Boulic, « Characterizing first and third person viewpoints and their alternation for embodied interaction in virtual reality », *PLOS ONE*, vol. 12, n° 12, p. e0190109, déc. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0190109.
- [221] L. Pederzoli, W. Giroladini, G. M. Duma, G. Mento, E. Prati, et P. E. Tressoldi, « Out-of-Body Experience Induced by Hypnotic Suggestions: An Exploratory Neurophenomenological Study », Social Science Research Network, Rochester, NY, SSRN Scholarly Paper ID 2820689, août 2016. doi: 10.2139/ssrn.2820689.
- [222] M. R. Nash, S. J. Lynn, et S. M. Stanley, « The Direct Hypnotic Suggestion of Altered Mind/Body Perception », *American Journal of Clinical Hypnosis*, vol. 27, n° 2, p. 95-102, oct. 1984, doi: 10.1080/00029157.1984.10402863.
- [223] O. Blanke, T. Landis, L. Spinelli, et M. Seeck, « Out-of-body experience and autoscopia of neurological origin », *Brain*, vol. 127, n° 2, p. 243-258, févr. 2004, doi: 10.1093/brain/awh040.
- [224] M. Zeev-Wolf, Y. Dor-Ziderman, A. Goldstein, O. Bonne, et E. G. Abramowitz, « Oscillatory brain mechanisms of the hypnotically-induced out-of-body experience », *Cortex*, vol. 96, p. 19-30, nov. 2017, doi: 10.1016/j.cortex.2017.08.025.

- [225] M. Mori, K. F. MacDorman, et N. Kageki, « The Uncanny Valley [From the Field] », *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 19, n° 2, p. 98-100, juin 2012, doi: 10.1109/MRA.2012.2192811.
- [226] E. Garcia, D. Godoy-Izquierdo, J. F. Godoy, M. Perez, et I. Lopez-Chicheri, « Gender differences in pressure pain threshold in a repeated measures assessment », *Psychology, Health & Medicine*, vol. 12, n° 5, p. 567-579, oct. 2007, doi: 10.1080/13548500701203433.
- [227] O. Komiyama et A. De Laat, « Tactile and pain thresholds in the intra- and extra-oral regions of symptom-free subjects », *Pain*, vol. 115, n° 3, p. 308-315, juin 2005, doi: 10.1016/j.pain.2005.03.006.
- [228] R. R. Edwards, R. B. Fillingim, et T. J. Ness, « Age-related differences in endogenous pain modulation: a comparison of diffuse noxious inhibitory controls in healthy older and younger adults », *Pain*, vol. 101, n° 1, p. 155-165, janv. 2003, doi: 10.1016/S0304-3959(02)00324-X.
- [229] H. Kim, J. K. Neubert, J. S. Rowan, J. S. Brahim, M. J. Iadarola, et R. A. Dionne, « Comparison of experimental and acute clinical pain responses in humans as pain phenotypes », *The Journal of Pain*, vol. 5, n° 7, p. 377-384, sept. 2004, doi: 10.1016/j.jpain.2004.06.003.
- [230] M. Siedlecka, N. Spychała, M. Łukowska, K. Wiercioch, et M. Wierzchoń, « Rubber Hand Illusion Increases Pain Caused by Electric Stimuli », *The Journal of Pain*, vol. 19, n° 1, p. 35-45, janv. 2018, doi: 10.1016/j.jpain.2017.08.005.
- [231] E. J. Lier, J. M. Oosterman, R. Assmann, M. de Vries, et H. van Goor, « The effect of Virtual Reality on evoked potentials following painful electrical stimuli and subjective pain », *Sci Rep*, vol. 10, n° 1, p. 9067, juin 2020, doi: 10.1038/s41598-020-66035-4.
- [232] M. T. Jensen et K. L. Petersen, « Gender Differences in Pain and Secondary Hyperalgesia After Heat/Capsaicin Sensitization in Healthy Volunteers », *The Journal of Pain*, vol. 7, n° 3, p. 211-217, mars 2006, doi: 10.1016/j.jpain.2005.10.013.
- [233] P. Gazerani, O. Kaeseler Andersen, et L. Arendt-Nielsen, « A human experimental capsaicin model for trigeminal sensitization. Gender-specific differences », *Pain*, vol. 118, n° 1, p. 155-163, nov. 2005, doi: 10.1016/j.pain.2005.08.009.
- [234] E. E. Bragdon *et al.*, « Group differences in pain modulation: pain-free women compared to pain-free men and to women with TMD », *Pain*, vol. 96, n° 3, p. 227-237, avr. 2002, doi: 10.1016/S0304-3959(01)00451-1.
- [235] R. R. Edwards, J. A. Haythornthwaite, M. J. Sullivan, et R. B. Fillingim, « Catastrophizing as a mediator of sex differences in pain: differential effects for daily pain versus laboratory-induced pain », *Pain*, vol. 111, n° 3, p. 335-341, oct. 2004, doi: 10.1016/j.pain.2004.07.012.

RÉSUMÉ

La douleur est à l'origine de plus de 90% des consultations médicales. La méthode thérapeutique la plus couramment utilisée pour diminuer la douleur est la voie médicamenteuse bien qu'elle ne s'avère pas être sans risque pour les patients puisqu'elle peut entraîner des effets secondaires, des dépendances ou des surdosages. Pour lutter contre ces effets indésirables, de nouvelles thérapies non invasives émergent telle que la réalité virtuelle. Afin d'approfondir cette approche, nous avons étudié au cours de cette thèse les effets d'une représentation visuelle d'une stimulation tactile sur les seuils douloureux et les niveaux d'incarnation chez l'Homme. Pour cela, nous avons modulé différentes variables d'une représentation visuelle, en réalité virtuelle et avons évalué les niveaux d'incarnation des participants dans leur avatar. De plus, nous avons évalué leur douleur objective et subjective lorsqu'une stimulation électrique était délivrée au niveau de leur avant-bras. Nous avons étudié ces effets lorsque la représentation visuelle était présente ou absente et synchrone ou asynchrone à une stimulation électrique (étude 1) ; lorsqu'elle était grossissante et localisée dans le corps ou hors du corps (étude 2) ; et enfin, lorsque le point de vue était à la première ou à la troisième personne (étude 3). Nos résultats ont montré que la présence d'une représentation visuelle grossissante diminuait la douleur par rapport à une absence de représentation visuelle ou à une présence sans grossissement. De même, lorsque deux représentations visuelles grossissent à deux vitesses différentes, le grossissement le plus important entraîne une augmentation de la douleur par rapport à un grossissement plus faible. Enfin, nos résultats ont également montré que le point de vue d'un participant à la troisième personne entraîne un effet analgésique (diminution de la douleur) par rapport à un point de vue à la première personne. En revanche, les autres variables étudiées de la représentation visuelle n'ont eu aucun impact sur les composantes de la douleur. Nos résultats suggèrent donc que la modulation d'une représentation visuelle dans un environnement virtuel est une approche intéressante et pertinente pour lutter contre la douleur chez l'Homme.

MOTS CLÉS

Douleur / Représentation visuelle / Réalité virtuelle / Neurosciences / Conscience corporelle / Avatar

ABSTRACT

Pain is the cause of more than 90% of medical consultations. The most commonly used therapeutic method to reduce pain is medication, although it is not without risk for patients as it can lead to side effects, dependency or overdose. To prevent these side effects, new non-invasive therapies are emerging such as virtual reality. In order to further investigate this approach, we studied during this thesis the effects of a visual representation of a tactile stimulation on pain thresholds and incarnation levels in humans. To do so, we modulated different variables of a visual representation, in virtual reality, and evaluated the incarnation levels of the participants in their avatar. In addition, we assessed their objective and subjective pain when electrical stimulation was delivered to their forearm. We investigated these effects when the visual representation was present or absent and synchronous or asynchronous to an electrical stimulation (Study 1); when it was magnified and localized in the body or out of the body (Study 2); and finally, when the point of view was in the first- or third-person perspective (Study 3). Our results showed that the presence of an enlarging visual representation decreased pain compared to no visual representation or presence without magnification. Similarly, when two visual representations were enlarged at two different rates, the greater magnification results in increased pain compared to a lower magnification. Finally, our results also showed that a participant's third-person perspective leads to an analgesic effect (decreased pain) compared to a first-person perspective. In contrast, the other studied variables of the visual representation had no impact on the pain components. Our results therefore suggest that modulating a visual representation in a virtual environment is an interesting and relevant approach to the management of pain in humans.

KEYWORDS

Pain / Visual representation / Virtual reality / Neurosciences / Body awareness / Avatar